



# Fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem für automatische Fahrzeuge

Michael Düring

Berichte aus dem DLR-Institut  
für Verkehrssystemtechnik

Band 32



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



# **Fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem für automatische Fahrzeuge**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Michael Düring, M. Sc.  
aus: Braunschweig

eingereicht am: 08. Dezember 2016  
mündliche Prüfung am: 02. Juni 2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder



**Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik**

**Band 32**

**Fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und  
Sicherheitssystem für automatische Fahrzeuge**

**Michael Düring**

**Herausgeber:**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

**ISSN: 1866-721X**

DLR-TS 1.32

Braunschweig, im Juli 2017

Institutsdirektor:  
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasser:  
Michael Düring



# Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

in Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Der vorliegende Band stellt ein fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem vor, das in Konfliktsituationen die wechselseitige Beeinflussung mehrerer Beteiligter berücksichtigt und mit der Planung kooperativer Manöver eine sichere Konfliktlösung bietet. Hierfür werden bekannte Methoden systematisch hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit untersucht und die Notwendigkeit neuer Lösungskonzepte abgeleitet. Während des Konflikts zu bewältigende Aufgaben werden mithilfe der kooperativen Abstimmung zwischen den Verkehrsteilnehmern mittels funkbasierter Kommunikation aufgeteilt. Mit der kooperativen Manöverplanung wird eine neuartige Methode vorgestellt, die die gleichzeitige Planung mehrerer Fahrzeuge übernimmt und diese sicher aus der Konfliktsituation herausführt. Die vielseitige Verwendbarkeit des Systems in unterschiedlichen Konfliktsituationen zeigen die Ergebnisse von Simulationen. Das vorgestellte fahrzeugübergreifende kooperative System bietet Lösungen in verkehrlichen Konfliktsituationen und leistet damit einen wertvollen Beitrag für mehr Sicherheit im Verkehr.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer





# Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Abteilung *Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit* der Volkswagen Konzernforschung im regen Austausch mit dem *Institut für Verkehrssystemtechnik* des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. am Standort Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer für die engagierte Betreuung der vorliegenden Arbeit. Die Anregungen, die in einer Vielzahl von Diskussionen aufkamen, haben wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit und zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder und Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats bzw. des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei meinen Vorgesetzten Herrn Dipl.-Ing. Thomas Ruchatz und Herrn Dipl.-Ing. Hans-Christian Schaub für die inhaltlichen Anregungen und den mir gewährten Freiraum während der gesamten Doktorandenzeit bedanken. Die mir entgegengebrachte Unterstützung ist in diesem Umfang nicht selbstverständlich.

Großer Dank gebührt meinen Kollegen der Unterabteilung *Integrale Sicherheit*. Eine besondere Stellung nehmen dabei Herr Dr.-Ing. Kai Franke und Herr Reza Balaghiasefi, M. Sc. ein. In freundlicher, zielgerichteter und aufrichtiger Arbeitsatmosphäre waren überaus konstruktive Diskussionen möglich, die auch das Ausräumen von Behauptungen ohne Beweis (BoB) zum Ziel hatten. Ohne eure Anmerkungen und Meinungen wäre die vorliegende Arbeit nicht das, was sie heute ist.

Nicht weniger zum Erfolg dieser Arbeit haben zahlreiche Studenten beigetragen. Stellvertretend möchte ich mich bei Herrn Markus Belkner, M. Sc., Herrn Robert Lösch, B. Sc. und Herrn Clemens Nietzschmann, B. Sc. für herausragende Leistungen bedanken. Die stets angenehme Arbeit mit euch hat sehr viele sehr gute Ergebnisse hervorgebracht, ohne dabei jeden Rückschlag - das müsste *eigentlich* klappen - zu ernst zu nehmen.

Auch möchte ich mich für die stets herausragende und professionelle Arbeit bei Herrn Dipl.-Ing. Heiko Scholz, Herrn Deniz Benli, B. Sc. und Herrn Dipl.-Ing. Hussein Al-Ahkras bedanken. Ohne eure Arbeit würden einige Teile dieser Dissertation nicht in der heutigen Form vorliegen und nur in kleinem Maße erlebbar sein.

Stellvertretend für viele Kollegen und Mitstreiter, mit denen ich teilweise stundenlange Gespräche über konzeptionelle Teile dieser Arbeit geführt habe, möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Tobias Hesse, Herrn Dipl.-Ing. Christian Löper, Herrn Patrick Pascheka, M. Sc. und Herrn Dipl.-Ing. Florian Weinert bedanken.

Der Dank an meine Freunde und meine Familie liegt mir besonders am Herzen, da ich euch durch das zeitintensive Unterfangen *Doktorarbeit* viel Verständnis abgefordert habe. Meinen Eltern, Dipl.-Ing. Wolfgang und Barbara Düring, gebührt Dank, da ihr mich auf meinem Weg stets unterstützt habt. Auch zu Hause wird nach Abschluss der Arbeit wieder ein wenig mehr Normalität einkehren. Für das inhaltliche Diskutieren, das Korrekturlesen und die allgemein uneingeschränkte Unterstützung danke ich meiner Frau, Denise Düring, M. Sc. Dein beispielloser Rückhalt gab und gibt mir Kraft für meinen Weg und hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Braunschweig, im Dezember 2016

Michael Düring



Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.



# Kurzfassung

Konfliktsituationen mit mehreren Beteiligten sind für Fahrzeugführer und konventionelle Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme durch ihre hohe Komplexität schwer beherrschbar. So geschehen viele Unfälle auf den Straßen dieser Welt, die durch gemeinschaftlich abgestimmte Fahrmanöver verhindert oder in ihren Unfallfolgen gemindert werden könnten. Die vorliegende Arbeit adressiert dieses Potenzial und beschäftigt sich mit der Entwicklung und prototypischen Umsetzung eines fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems, welches mehrere Fahrzeuge über eine funkbasierte Kommunikation miteinander verbindet, sowie unfallfreie Lösungen berechnet und durchführt. In diesem Zusammenhang werden drei Forschungsfragen aufgestellt, die eine Definition von kooperativem Verhalten, eine Methode zur Koordination der anfallenden Aufgaben (Aufgabenkoordination) und eine Methode zur gemeinsamen Fahrmanöverplanung (Fahrmanöverkoordination) adressieren. Der Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich der Forschungsfragen wird mithilfe einer systematischen Literaturstudie ermittelt, die für den Leser in einem Überblick dargestellt und hinsichtlich einer möglichen Beantwortung der Forschungsfragen ausgewertet wird. Es zeigt sich, dass die drei Forschungsfragen mit ihren Anforderungen bislang unbeantwortet sind.

Zur Definition von kooperativem Verhalten werden Eigenschaften von diesem aufgezeigt, die in notwendige und hinreichende Bedingungen überführt werden. Mit der zusätzlichen Berücksichtigung von Reziprozität ergibt sich eine Definition von kooperativem Verhalten, welche durch die Steigerung des Gesamtnutzens die Unterscheidung zwischen unkooperativem Verhalten auf der einen Seite und rational-kooperativem, altruistisch-kooperativem bzw. egoistisch-kooperativem Verhalten auf der anderen Seite ermöglicht. Ein Vergleich mit den aus dem Stand der Technik bekannten Definitionen zeigt den Neuigkeitswert der entwickelten Definition. In ausgewählten Situationen wird die Definition in Simulationen angewandt.

Die Aufgabenkoordination baut auf einem deliberativen Kontrollparadigma auf und wird durch Module zum Einsatz für vernetzte Fahrzeuge erweitert. Weiterhin werden neue Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation-Nachrichten definiert, die für den Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen sorgen. Mit der neu geschaffenen Aufgabenkoordination, der kooperativen Abstimmung, ist es möglich, in erkannten Konfliktsituationen gemeinschaftliche Reaktionen zur Bewältigung des Konflikts zu bestimmen und durchzuführen. Die kooperative Abstimmung stellt sich bei der Gegenüberstellung mit den aus dem Stand der Technik bekannten Aufgabenkoordinationen als neuartige Methode heraus, die alle an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Unterschiedliche Anwendungen zeigen die Anpassungsfähigkeit der kooperativen Abstimmung durch Bildung von Derivaten.

Die Planung gemeinsamer Fahrmanöver wird durch die Bestimmung von sicheren Endzuständen und sicheren Trajektorien zu diesen Endzuständen für alle am Konflikt beteiligten Fahrzeuge ermöglicht. Die so genannte kooperative Manöverplanung stellt somit eine Planungsmethode für mehrere Fahrzeuge gleichzeitig dar, die zunächst Endzustände für alle Teilnehmer berechnet und unsichere Endzustände aussortiert. Anschließend wird eine Vielzahl von Trajektorien zu jedem der sicheren Endzustände erzeugt und mit allen errechneten Trajektorien der anderen Fahrzeuge kombiniert. Nachdem die kollisionsfreien Trajektorienkombinationen mittels Kostenfunktionen auf ihre Nützlichkeit hin bewertet werden, wird der Manöverplan mit den geringsten Gesamtkosten ausgewählt und durchgeführt. Der Vergleich mit dem Stand der Technik zeigt den Neuigkeitswert der kooperativen Manöverplanung durch einen Abgleich der Eigenschaften der bekannten Methoden und eine Gegenüberstellung in einer Software-in-the-Loop-Simulationsumgebung. Eine Vielzahl Software-in-the-Loop- und Hardware-in-the-Loop-Simulationen beweisen die vielseitige Einsetzbarkeit und veranschaulichen das Verhalten der kooperativen Manöverplanung in unterschiedlichen Situationen und Anwendungen.



# Abstract

Critical situations involving multiple vehicles are rarely controlled by the associated drivers. This is one reason for the remaining number of accidents which could possibly be prevented or at least mitigated with jointly planned and conducted driving maneuvers. This potential is addressed in the dissertation at hand by developing a prototypical cooperative driver assistance and safety system coordinating multiple vehicles cooperatively using vehicle-to-vehicle-communication. In this context, three research questions reflect challenges on the road towards such a system. The research questions deal with defining a cooperative behavior, creating a method allowing to allocate coordinative tasks (task coordination), and generating a method enabling to plan joint cooperative maneuvers (maneuver coordination). Regarding the proposed research questions, a systematic literature review reveals the state-of-the-art which is first presented in an overview and afterwards used to derive open issues. The result is that the three research questions remain relevant and unanswered.

In order to define cooperative behavior, properties are identified and categorized in sufficient and necessary conditions. An additional consideration of reciprocity enables the derivation of a definition of cooperative behavior which aims to increase the total utility. Cooperative behavior may further be separated into rational-cooperative, altruistic-cooperative, and egoistic-cooperative behavior. A comparison with known definitions of the state-of-the-art demonstrates the innovation of the novel definition, which is applied in chosen situations.

The task coordination relies on a deliberative control architecture and is enhanced for handling automated and connected vehicles. Moreover, new vehicle-to-vehicle-communication messages are defined for exchanging information between vehicles. That new control architecture, called cooperative coordination, enables to determine and conduct cooperative maneuvers in perceived conflict situations. The novelty of the cooperative coordination architecture is shown in a comparison with existing task coordination methods. The adaptability of the proposed approach is demonstrated by mastering diverse applications.

Joint cooperative maneuvers are planned by determining safe end states and safe trajectories towards these end states for all involved vehicles. The so-called cooperative maneuver planning is a method for simultaneously planning maneuvers for multiple vehicles. Therefore, it uses the aforementioned concept of calculating end states for each vehicle and filtering out unsafe end states. Afterwards, a trajectory generation module calculates a host of trajectories towards the remaining safe end states for each vehicle, which are eventually combined. A combination of a safe trajectory and a safe end state of all participants is called a plan. The most cost efficient plan is identified by an assessment based on a cost function with several cost terms regarding safety, comfort, and efficiency. The plan is disseminated among involved vehicles and conducted afterwards. An evaluation of the cooperative maneuver planning is conducted in a software-in-the-loop and a hardware-in-the-loop simulation environment and shows the behavior of that approach in a broad variety of situations. Moreover, a comparison of the new planning method with state-of-the-art planners in the software-in-the-loop simulation environment underlines differences and innovations of the cooperative maneuver planning.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort des Herausgebers</b> . . . . .	iii
<b>Vorwort des Autors</b> . . . . .	v
<b>Kurzfassung</b> . . . . .	ix
<b>Abstract</b> . . . . .	xi
<b>Inhaltsverzeichnis</b> . . . . .	xiii
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .	xvii
<b>Symbolverzeichnis</b> . . . . .	xix
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	1
1.1 Ziele und Forschungsfragen . . . . .	2
1.2 Wissenschaftliche Beiträge . . . . .	5
1.3 Struktur der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b> . . . . .	7
2.1 Systematische Literaturstudie . . . . .	8
2.2 Kooperatives Verhalten . . . . .	10
2.2.1 Überblick . . . . .	10
2.2.2 Erkenntnisse . . . . .	12
2.2.3 Beantwortungsgrad der Forschungsfrage und Zusammenfassung . . . . .	14
2.3 Aufgabenkoordination mehrerer Teilnehmer . . . . .	16
2.3.1 Überblick . . . . .	16
2.3.2 Erkenntnisse . . . . .	20
2.3.3 Beantwortungsgrad der Forschungsfrage und Zusammenfassung . . . . .	23
2.4 Fahrmanöverkoordination mehrerer Teilnehmer . . . . .	25
2.4.1 Überblick . . . . .	25
2.4.2 Erkenntnisse . . . . .	30
2.4.3 Beantwortungsgrad der Forschungsfrage und Zusammenfassung . . . . .	33
2.5 Zusammenfassung des Kapitels . . . . .	35
<b>3 Kooperatives Verhalten</b> . . . . .	37
3.1 Begriffsbildung . . . . .	38
3.1.1 Eigenschaften kooperativen Verhaltens . . . . .	38
3.1.2 Vorläufige Definition und Differenzierung kooperativer Verhaltensweisen . . . . .	40
3.2 Fairness . . . . .	42
3.3 Eigenschaften und Bewertung der Definition kooperativen Verhaltens . . . . .	44
3.4 Zusammenfassung des Kapitels . . . . .	46

<b>4 Aufgabenkoordination mehrerer Teilnehmer</b>	47
4.1 Aufbau der Aufgabenkoordination	48
4.2 Benötigte Nachrichten für die kooperative Abstimmung	50
4.3 Eigenschaften und Bewertung der kooperativen Abstimmung	52
4.4 Zusammenfassung des Kapitels	55
<b>5 Fahrmanöverkoordination mehrerer Teilnehmer</b>	57
5.1 Prinzip der kooperativen Manöverplanung	58
5.2 Modul I - Planerzeugung	59
5.2.1 Zielpunkterzeugung	60
5.2.2 Risikoanalyse Zielpunkte	68
5.2.3 Trajektorienerzeugung	69
5.2.4 Risikoanalyse Trajektorien	75
5.3 Modul II - Planbewertung	76
5.3.1 Bewertungskriterien	76
5.3.2 Primärkostenberechnung	78
5.3.3 Finale Kostenberechnung	83
5.4 Modul III - Planauswahl	85
5.5 Umgang mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern	86
5.6 Eigenschaften und Bewertung der kooperativen Manöverplanung	87
5.7 Zusammenfassung des Kapitels	90
<b>6 Anwendung und Ergebnisse</b>	91
6.1 Testumgebungen und Grundeinstellungen	92
6.1.1 Testumgebungen	92
6.1.2 Grundeinstellungen	94
6.2 Kooperative Manöverplanung	95
6.2.1 Test- und Szenarienbeschreibung	95
6.2.2 Anforderungsabgleich	97
6.2.3 Vergleich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik	109
6.2.4 Zusammenfassung und Ausblick	113
6.3 Kooperative Abstimmung	114
6.3.1 Testbeschreibung	114
6.3.2 Anforderungsabgleich	115
6.3.3 Zusammenfassung und Ausblick	118
6.4 Kooperatives Verhalten	118
6.4.1 Test- und Szenarienbeschreibung	118
6.4.2 Anforderungsabgleich	119
6.4.3 Zusammenfassung und Ausblick	121
6.5 Zusammenfassung des Kapitels	123
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	125
<b>Anhang</b>	129
A.1 Kontrollparadigmen	129
A.2 Planungsmethoden und deren Anwendung	130
A.3 Fallanalyse Zielpunktberechnung	136
A.4 Berechnung des Umschaltzeitpunkts	139
A.5 Berechnung der Beschleunigungen	140
A.6 Einstellungen der Risikoanalyse	141
A.7 Berechnung des empirischen Faktors $\zeta$	142

A.8	Einstellungen zur Kostenberechnung . . . . .	143
A.9	Erzeugung konkreter Szenarien . . . . .	146
A.10	Kooperative Manöverplanung im Realfahrzeug . . . . .	149
<b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>		<b>152</b>
<b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>		<b>153</b>
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>		<b>155</b>



# Abkürzungsverzeichnis

<b>3F-Parameterraum</b>	Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung Parameterraum
<b>A3K</b>	Auffahren auf die Autobahn mit drei Fahrzeugen für Komfortfunktion
<b>A3S</b>	Auffahren auf die Autobahn mit drei Fahrzeugen für Sicherheitsfunktion
<b>ABS</b>	Antiblockiersystem
<b>ACC</b>	Adaptive Cruise Control
<b>ACM</b>	Accept Cooperation Message
<b>ADTF</b>	Automotive Data and Time-Triggered Framework
<b>AHS</b>	Automated Highway System
<b>ANB</b>	automatische Notbremse
<b>ASR</b>	Antriebsschlupfregelung
<b>CACC</b>	Cooperative Adaptive Cruise Control
<b>CAS</b>	Collision Avoidance System
<b>CC</b>	Cruise Control
<b>CCM</b>	Confirmation of Cooperation Message
<b>COMPACT</b>	COMbining oPportunities of ACTion
<b>DAI</b>	Distributed Artificial Intelligence
<b>DVR</b>	Deutscher Verkehrssicherheitsrat
<b>ECM</b>	Evaluation of Cooperation Message
<b>EKA</b>	Entwurfsklasse für Autobahnen
<b>EPM</b>	Environmental Perception Message
<b>ESP</b>	elektronisches Stabilitätsprogramm
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>F2</b>	Fußgänger auf einer Stadtstraße mit zwei Fahrzeugen
<b>FPGA</b>	Feldprogrammierbare (Logik-)Gatter-Anordnung
<b>HiL</b>	Hardware-in-the-Loop

**I2V** Infrastructure-to-Vehicle-Kommunikation

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**ITS** Intelligent Transportation Systems

**LKW** Lastkraftwagen

**MAS** Multi-Agenten-Systeme

**MILP** Mixed Integer Linear Programming

**OBB** Oriented Bounding Box

**OCM** Offers of Cooperation Message

**OEM** Original Equipment Manufacturer

**P3** Platooning auf einer Landstraße mit drei Fahrzeugen

**PATH** Partners for Advanced Transit and Highways

**PKW** Personenkraftwagen

**RAA** Richtlinien für die Anlage von Autobahnen

**RAL** Richtlinien für die Anlage von Landstraßen

**RASt** Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen

**RCM** Request for Cooperation Message

**RQ** Regelquerschnitt

**SAT** Separating Axis Theorem

**SCM** Status of Cooperation Message

**SFB/TR 28** Sonderforschungsbereich/Transregio 28 „Kognitive Automobile“

**SiL** Software-in-the-Loop

**SP** Startpunkt

**StVO** Straßenverkehrsordnung

**T2** Türöffnung trotz Verkehr auf Stadtstraße mit zwei Fahrzeugen

**TTC** Time-To-Collision

**V2I** Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation

**V2V** Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation

**V2X** Vehicle-to-X-Kommunikation

**VD** Virtual Test Drive

**ZP** Zielpunkt

**Ü3** Überholen auf der Landstraße mit drei Fahrzeugen

# Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5$	m	Substitute zur Erreichung einer besseren Übersichtlichkeit
$\Delta\psi, \Delta\psi(t)$	°	Änderung der Fahrzeugausrichtung zwischen zwei Zeitschritten/Änderung des Gierwinkels
$\Delta\psi_{\text{Summe}}$	°	Winkel zur Berücksichtigung der Drehung des Fahrzeugs/des Gierwinkels bei der Berechnung konsekutiver Punkte der Modelltrajektorien
$\Delta t$	s	Zeit zwischen zwei Zeitschritten
$\Delta x$	m	Änderung der relativen Koordinate entlang der Fahrbahnbegrenzung (global), Änderung der Längsposition des Mittelpunkts des Fahrzeugs (lokal)
$\Delta y$	m	Änderung der relativen Koordinate senkrecht zur Fahrbahnbegrenzung (global), Änderung der Querposition des Mittelpunkts des Fahrzeugs (lokal)
$\gamma$	°	Hilfswinkel zur Berechnung einer lenkenden Modelltrajektorie
$\mu$	—	Reibbeiwert
$\mu_{k(x)}$	—	Zugehörigkeitswert
$\overline{AB}$	m	Sehne zur Berechnung des zurückgelegten Weges auf der Modelltrajektorie
$\phi$	°	Hilfswinkel zur Berechnung einer lenkenden Modelltrajektorie
$\psi, \psi(t)$	°	relative Fahrzeugausrichtung zur Fahrbahn/Gierwinkel
$\psi^{\text{Ego}}, \psi^{\text{Gegner}}$	°	entspricht $\psi$ , zur Unterscheidung der Ego- und Gegnerfahrzeugausrichtung eingeführt
$\psi_0$	°	Anfangsfahrzeugausrichtung/Anfangsgierwinkel
$\zeta$	—	empirischer Faktor zur adaptiven Berechnung des Einflusses der Geschwindigkeit auf den Stillstandsquerabstand $D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}}$
$A$	s	Substitut zur Erreichung einer besseren Übersichtlichkeit
$a_{\text{Längs,max}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	maximales Beschleunigungsvermögen eines Fahrzeugs
$a_{\text{Längs,min}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	maximales Bremsvermögen eines Fahrzeugs
$a_{\text{Längs}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung in Fahrzeugrichtung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$a_{\text{Quer},1}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	beispielhafte Beschleunigung senkrecht zur Fahrzeugrichtung
$a_{\text{Quer},\text{max}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	maximale Beschleunigung senkrecht zur Fahrzeugrichtung
$a_{\text{Quer}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung senkrecht zur Fahrzeugrichtung
$a_{U_{1,2}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Längsbeschleunigungen zur Anwendung nach dem Umschaltzeitpunkt $t_U$
$A_i$	—	ein beliebiger Agent $i$ , der ein Teilnehmer einer gekoppelten Situation ist
$B, C$	$\text{s}^2$	Substitute zur Erreichung einer besseren Übersichtlichkeit
$b_{\text{Ego}}$	m	Breite des Fahrzeugs
$b_S$	m	Breite der Straße
$c_n$	$\text{m}^{(n+1)}$	Koeffizienten zur eindeutigen Bestimmung eines (Teil-)Pfads
$d_{\text{ist}}^{\text{Ego-[Gegner/Stra\ss e]}}$	m	kürzester Längsabstand zwischen dem Egofahrzeug und einem Gegnerfahrzeug/der Straßenbegrenzung
$D_{\text{ist}}^{\text{Ego-[Gegner/Stra\ss e]}}$	m	kürzester Querabstand zwischen dem Egofahrzeug und einem Gegnerfahrzeug/der Straßenbegrenzung
$d_{\text{sicher}}^{\text{Ego}}$	m	Stillstandsentfernung, bei dessen Unterschreitung Kosten entstehen
$D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}}$	m	Stillstandsquerabstand, bei dessen Unterschreitung Kosten entstehen
$F_k$	—	Zugehörigkeitsfaktor
$F_L$	—	Faktor zur Gewichtung von Längsbeschleunigungen bei der Kostenberechnung
$F_Q$	—	Faktor zur Gewichtung von Querbeschleunigungen bei der Kostenberechnung
$F_x$	N	Kraft in x-Richtung/Längsrichtung des Fahrzeugs
$F_y$	N	Kraft in y-Richtung/Querrichtung des Fahrzeugs
$F_z$	N	Kraft in z-Richtung/Lotrichtung des Fahrzeugs
$g$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Erdbeschleunigung
$k$	—	Abweichung bei beispielhafter Erläuterung der Fuzzy-Funktionen
$K_1^*$	—	finale Kosten bei Annäherung an die Grenzen des Kammschen Kreises
$K_2^*$	—	finale Kosten bei Verbrauch infolge eines Manövers
$K_3^*$	—	finale Kosten bei Unterschreitung des Längsabstands
$K_4^*$	—	finale Kosten bei Unterschreitung des Querabstands
$K_5^*$	—	finale Kosten durch den Anstieg sicherheitsrelevanter finaler Kostenwerte
$K_6^*$	—	finale Kosten durch das Abfahren unkomfortabler Trajektorien
$K_7^*$	—	finale Kosten bei Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit



Symbol	Einheit	Beschreibung
$K_n^*$	—	finale Kosten
$K_1$	—	Primärkosten bezüglich der Ausnutzung des Kammschen Kreises
$K_2$	—	Primärkosten bezüglich des Verbrauchs
$K_3$	—	Primärkosten bezüglich des Längsabstands zum Straßenrand und zu anderen Objekten
$K_4$	—	Primärkosten bezüglich des Queraabstands zum Straßenrand und zu anderen Objekten
$K_5$	—	Primärkosten bezüglich des Sicherheitsfaktors
$K_6$	—	Primärkosten bezüglich des Fahrkomforts
$K_7$	—	Primärkosten bezüglich der Wunschgeschwindigkeit
$K_{G(t-\Delta t)}$	—	vergangene Gesamtkosten von $i$ Agenten
$K_G$	—	Gesamtkosten von $i$ Agenten
$L, L(x)$	m	Länge eines Pfads
$N_{G(t-\Delta t)}$	—	vergänger Gesamtnutzen von $i$ Agenten
$N_G$	—	Gesamtnutzen von $i$ Agenten
$n_i$	—	Nutzen eines Agenten $A_i$
$r, r(t)$	m	gefahrener Radius auf einer Modelltrajektorie
$r_{\min}$	m	Wendekreis des Fahrzeugs
$s, s(t)$	m	in der Zeit $t$ zurückgelegter Weg
$S_{\text{Längs}}$	—	Sicherheitsabstand in Längsrichtung des Fahrzeugs
$S_{\text{Quer}}$	—	Sicherheitsabstand in Querrichtung des Fahrzeugs
$s_0$	m	zu Beginn der Trajektorie zurückgelegter Weg
$s_1$	m	nach dem Folgen der Trajektorie zurückgelegter Weg
$s_U$	m	zum Umschaltzeitpunkt $t_U$ zurückgelegter Weg
$T$	s	die Manöverdauer gibt an, wie lange ein berechnetes Manöver durchgeführt wird und somit gültig ist
$t$	s	laufende Zeit
$T_{\text{Betracht}}$	s	Betrachtungshorizont, in dem über die Manöverdauer $T$ hinaus eine kollisionsfreie Durchführung der Manöver garantiert wird
$t_{\text{WK}}$	s	Zeitpunkt, (bis) zu dem der Wendekreis unterschritten wird (ist)

Symbol	Einheit	Beschreibung
$t_{GL}$	s	Gegenlenkzeitpunkt, also der Zeitpunkt, zu dem ein Gegenlenken notwendig ist, um wieder eine zur Fahrbahn parallele Fahrzeugausrichtung zu erhalten.
$t_0$	s	Startzeitpunkt zur Berechnung des Gegenlenkzeitpunkts
$t_1$	s	Endzeitpunkt zur Berechnung des Gegenlenkzeitpunkts
$t_A$	s	beliebiger Zeitpunkt
$t_U$	s	Umschaltzeitpunkt zwischen Längsbeschleunigungen zur Vollendung eines Pfads zu einer Trajektorie
$v, v(t)$	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit der Teilnehmer (global), Eigengeschwindigkeit (lokal)
$v_{ist}^{Ego}, v_{ist}^{Gegner}$	$\frac{m}{s}$	entspricht $v$ , zur Unterscheidung der Ego- und Gegnergeschwindigkeit eingeführt
$v_{soll}^{Ego}$	$\frac{m}{s}$	Wunschgeschwindigkeit des Egofahrzeugs
$v_{max}$	$\frac{m}{s}$	maximale Geschwindigkeit eines Fahrzeugs
$v_{Umgebung,max}$	$\frac{m}{s}$	erlaubte Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs
$v_{1A,B,C}$	$\frac{m}{s}$	unterschiedliche Endgeschwindigkeiten eines Zielpunkts
$v_0$	$\frac{m}{s}$	Startgeschwindigkeit
$v_1$	$\frac{m}{s}$	Endgeschwindigkeit
$v_U$	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit im Umschaltpunkt
$x$	m	relative Koordinate entlang der Fahrbahnbegrenzung (global), Längsposition des Mittelpunkts des Fahrzeugs (lokal)
$x_{E1,E2}$	m	Extremstellen der zweiten Ableitung des Polynoms
$x_{GP}$	m	Koordinate eines Gitterpunkts entlang der Fahrbahn
$x_0$	m	Startkoordinate eines (Teil-)Pfads entlang der Fahrbahn
$x_1$	m	Endkoordinate eines (Teil-)Pfads entlang der Fahrbahn
$y, y(x)$	m	relative Koordinate senkrecht zur Fahrbahnbegrenzung (global), Querposition des Mittelpunkts des Fahrzeugs (lokal)
$y_0$	m	Startkoordinate eines (Teil-)Pfads senkrecht zur Fahrbahn
$y_1$	m	Endkoordinate eines (Teil-)Pfads senkrecht zur Fahrbahn

# 1 Einleitung

Verbesserungen im Bereich der Verkehrssicherheit sorgen seit mehreren Jahrzehnten für eine rückläufige Anzahl von Verkehrstoten in Deutschland. Seit dem Höchstwert von 21.332 Verkehrstoten im Jahr 1970 wurde die Anzahl der im Verkehr Getöteten auf 3.206 im Jahre 2016 gesenkt [272]. Das entspricht einem Rückgang um 85 %. Erreicht wurde dies mit einer Mischung aus Maßnahmen: Neben einer angepassten Gesetzgebung, die unter anderem den Alkohol- und Drogenkonsum im Straßenverkehr regelt, einer verbesserten Führerscheinausbildung, der Einführung der Sicherheitsgurtpflicht und Verbesserungen in der Rettungskette wurde durch Sicherheitssysteme aus der Forschung und Entwicklung der Automobilindustrie ein Beitrag zur Fahrzeugsicherheit geleistet [25, 30, 270].

Die an der Verkehrssicherheit Beteiligten forcieren eine weitere Senkung der Unfallopfer im Straßenverkehr. So sprach die schwedische Regierung erstmals 1995 von der *Vision Zero*, die 1997 in einer parlamentarischen Resolution als Grundsatz für die schwedische Verkehrssicherheit gesetzt wurde und die Senkung der Unfallopfer auf die Zahl Null zum Ziel hat [292]. Seit 2007 arbeitet der Deutsche Verkehrssicherheitsrat (DVR) unter dem Leitbild der *Vision Zero* mit dem Slogan „Keiner kommt um. Alle kommen an.“ [49]. Dabei werden vier Axiome aufgestellt: die Unverhandelbarkeit des Lebens, die Fehlbarkeit des Menschen, die physischen Belastbarkeitsgrenzen des Menschen und das Recht der Menschen auf ein sicheres Verkehrssystem. Darüber hinaus hat der DVR ein Eckpunktepapier zur Verkehrssicherheit 2020 herausgegeben, in dem die Reduzierung der im Verkehr Getöteten im Zeitraum von 2010 bis 2020 um 40 % gefordert wird [48]. Dieser Gedanke wurde auch in der Industrie aufgegriffen und ist in die Firmenphilosophien unterschiedlicher Unternehmen integriert worden. Beispielsweise hat Volvo im Jahr 2009 eine *Vision 2020* veröffentlicht, in der proklamiert wird, dass im Jahr 2020 keine Person mehr in einem Fahrzeug der Marke Volvo verletzt wird oder ums Leben kommt [68].

Sicherheitssysteme in Fahrzeugen tragen schon heute einen Teil zur Erfüllung dieser Visionen bei. Sie lassen sich in passive und aktive Systeme unterteilen. Passive Systeme befassen sich mit der Begrenzung der Unfallfolgen, während aktive Systeme die Unfallvermeidung bzw. die Herabsetzung der Unfallhäufigkeit zum Ziel haben [152]. Obwohl die Eingriffsmöglichkeiten durch aktive Systeme auf die Längs- und Querdynamik sowie deren Kombination beschränkt sind, stellt die Entwicklung solcher Systeme ein großes Potenzial für die Fahrzeugsicherheit dar, wie sich durch die Vielzahl der entwickelten Systeme zeigt. Systeme zur Verbesserung der Beherrschbarkeit des Fahrzeugs wurden mit dem Antiblockiersystem (ABS) (1978), der Antriebsschlupfregelung (ASR) (1987) und dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) (1995) bereits eingeführt [25, 243]. Weiterhin werden Funktionen zur Übernahme der Fahrzeuglängsführung angeboten, wie zum Beispiel die automatische Notbremse (ANB), der Tempomat (Cruise Control (CC)) und der Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control (ACC)). Die Übernahme der Querführung wird dem Fahrer in bestimmten Situationen von Funktionen wie beispielsweise dem Fahrstreifenhalteassistenten oder einem automatischen Ausweichassistenten abgenommen. Die gleichzeitige Übernahme von Längs- und Querführung ist in kleinen Geschwindigkeitsbereichen bereits im Parkassistenten und in großen Geschwindigkeitsbereichen durch den Notausweichmanöverassistenten möglich. Eine Übersicht über die genannten Systeme ist in der Literatur zu finden [25, 310].

Die genannten fahrzeugindividuellen Systeme stoßen in bestimmten Situationen an ihre Grenzen. Dies sind Konfliktsituationen, in denen eine fahrzeugindividuelle Lösung nicht zwangsläufig unfallfrei ist. Abbildung 1.1 (links) zeigt eine Situation auf einer Landstraße, in der der Fahrer des roten Fahrzeugs zu einem Überholmanöver angesetzt hat, ohne dabei auf den Gegenverkehr zu achten. Eine solche Situation kann fahrzeugindividuell nicht garantiert unfallfrei aufgelöst werden, selbst wenn das Fahrzeug den Überholvorgang abbricht. So könnte



Abbildung 1.1: Konfliktsituationen, deren effiziente und unfallfreie Auflösung vom Verhalten mehrerer Fahrzeuge abhängt.

der Lastkraftwagen (LKW) die Situation ebenfalls bemerkt haben und seinerseits die Geschwindigkeit reduzieren, da er davon ausgeht, dass der Überholer den Überholvorgang beenden möchte. In diesem Fall könnte die Wahrscheinlichkeit der unfallfreien Bewältigung der Situation durch koordinierte Fahrmanöver erhöht werden. Abbildung 1.1 (Mitte) zeigt einen Auffädelversuch auf die Autobahn bei dichtem LKW-Verkehr. Ohne die Mitwirkung der LKW, also einer gemeinschaftlichen Problemlösung, ist eine effiziente Lösung nicht denkbar. Schließlich zeigt Abbildung 1.1 (rechts) ein sich im Einsatz befindliches Sondereinsatzfahrzeug, welches sich an eine durch Individualverkehr blockierte rote Lichtsignalanlage annähert. Auch hier liegt der Schlüssel in der gemeinschaftlichen bzw. kooperativen Auflösung der Situation, die durch eine koordiniert erzeugte Rettungsgasse aufgelöst werden kann. Neben einem kooperativen Sicherheitssystem ist es auch denkbar, gemeinschaftlich kooperative Komfort- oder Effizienzmanöver durchzuführen. In diesen Fällen wird die Konfliktsituation nicht durch einen drohenden Unfall, sondern durch eine andere zu lösende Aufgabe, wie beispielsweise das Einfädeln auf eine Autobahn oder das Auflösen eines Rückstaus vor einer rot zeigenden Lichtsignalanlage beschrieben. Zur Vermeidung von Missverständnissen und Reduzierung von Fehlern werden die Fahrer für die Dauer solcher Manöver aus der Fahraufgabe entlassen, müssen nach dem erfolgreich durchgeführten Manöver die Fahraufgaben jedoch wieder übernehmen.

Gemeinschaftliche Fahrmanöver ermöglichen die Auflösung von Konfliktsituationen, die mit fahrzeugindividuellen Systemen nur schwer oder gar nicht unfallvermeidend auflösbar sind. Dazu müssen abgestimmte Fahrmanöver berechnet und zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden. Diese werden dann automatisiert ausgeführt, da die beteiligten Fahrer durch das Nachfahren eines berechneten Fahrmanövers wegen ihrer Reaktionszeiten und Limitierungen im Folgeverhalten überfordert wären. Wenn in einer Situation das Sicherheits-, Komfort- oder Effizienzbedürfnis mindestens eines Fahrers nicht befriedigt wird, dann kann ein fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem die Koordination der Fahrzeuge mithilfe von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation – im Folgenden als Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation (V2V) bezeichnet – realisieren. Die Koordination umfasst mit der Aufgaben- und Fahrmanöverkoordination sowohl die taktische als auch die operative Ebene. Nachdem die Aufgaben durch die Fahrzeuge wahrgenommen wurden, wird die Konfliktsituation mittels eines gemeinschaftlich abgestimmten Fahrmanövers aufgelöst.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Darstellung der Machbarkeit einiger Aspekte eines fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems. Nicht bearbeitet werden Fragestellungen hinsichtlich der Mensch-Maschine-Schnittstelle, nachrichtentechnische Problemstellungen der V2V-Kommunikation, eine angepasste Umsetzung der Regelung und Herausforderungen einer seriennahen Umsetzung.

### 1.1 Ziele und Forschungsfragen

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems. Dazu werden drei Forschungsfragen aufgestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit beantwortet werden. Die Themenbereiche der drei Fragen lassen sich in eine Begriffsdefinition

von kooperativem Verhalten, die Entwicklung einer Methode zur Aufgabenkoordination und die Entwicklung einer Methode zur Fahrmanöverkoordination unterteilen. Unter dem Begriff der Methode wird in dieser Arbeit eine Handlungsvorschrift zur Lösung eines Problems verstanden. Die Forschungsfragen werden durch Anforderungen spezifiziert, die zu ihrer Beantwortung erfüllt sein müssen.

### **Themenbereich 1: Begriffsdefinition von kooperativem Verhalten**

Das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem führt in Konfliktsituationen gemeinschaftlich kooperative Fahrmanöver aus. Wie lassen sich kooperative von nicht kooperativen Fahrmanövern unterscheiden? Was sind die Voraussetzungen dafür, dass es zu kooperativem Verhalten kommen kann? Wie kann kooperatives Verhalten gemessen werden? Eine Definition soll eine Antwort auf diese Fragen geben.

### **Forschungsfrage 1: Wie kann kooperatives Verhalten definiert werden?**

Die Definition muss die Situation beschreiben, die eine Grundvoraussetzung für die Entstehung kooperativen Verhaltens ist. Auch muss sie die Teilnehmer und deren Interaktionen abbilden können. Die Interaktion muss zielgerichtet sein, damit kooperatives Verhalten seinen Sinn erfüllt. Das Ziel wird im Sinne einer gemeinschaftlichen Betrachtung beschrieben, welches den Nutzen und/oder die Kosten der Beteiligten berücksichtigt. Die Definition beschreibt die Interaktion zwischen den Teilnehmern als gewollte sowie zielgerichtete Interaktion. Schließlich kann die Definition nicht nur einen Spezialfall berücksichtigen, sondern soll von einer Situation auf die nächste zuverlässig übertragbar sein. Um das Bevorteilen oder Benachteiligen Einzelner über mehrere Interaktionen hinweg auszuschließen, findet das Prinzip der Reziprozität Anwendung. Unter Reziprozität wird in dieser Arbeit verstanden, dass ein Teilnehmer situationsabhängig und unter Berücksichtigung vergangener kooperativer Handlungen sowohl als Geber als auch als Empfänger auftreten kann.

Die vollständige Beantwortung der ersten Forschungsfrage erfordert die Erfüllung der folgenden Anforderungen:

1. die Beschreibung der notwendigen Situation,
2. die Nennung der Beteiligten und der Interaktion,
3. das Maß der Steigerung des Gesamtnutzens bzw. Verringerung der Gesamtkosten,
4. die Einschränkung auf ein gezieltes Verhalten, sowie
5. die Berücksichtigung von Reziprozität.

### **Themenbereich 2: Aufgabenkoordination**

Bevor kooperative, gemeinschaftliche Fahrmanöver durchgeführt werden können, ist die Verteilung und Bearbeitung einiger Aufgaben notwendig. Welche Aufgaben sind dabei zu erledigen? Wer übernimmt welche Aufgabe? Wie wird zwischen den Teilnehmern kommuniziert? Wie kann eine gemeinschaftliche Abarbeitung ermöglicht werden, ohne dass der Koordinationsprozess zum Erliegen kommt? Wie kann mit der gleichzeitigen Abarbeitung gleicher Aufgaben umgegangen werden? Die Aufgabenkoordination als Rahmenwerk des fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems soll die Antwort auf die Fragen liefern.

### **Forschungsfrage 2: Welche Methode zur Aufgabenkoordination ermöglicht ein gemeinsames Abarbeiten der Aufgaben des fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems?**

Die Aufgabenkoordination befähigt Fahrzeuge, fahrzeugübergreifend abgestimmte Fahrmanöver zu planen. Damit Fahrzeuge explizit miteinander kommunizieren können, wird ein geeignetes Kommunikationsmedium verwendet. Durch die geringen Entfernungen zwischen den interagierenden Fahrzeugen eignet sich die bereits vom Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) standardisierte V2V-Kommunikation als Austauschmedium. Der IEEE 802.11p Standard vernetzt Fahrzeuge untereinander und ermöglicht auch die Einbeziehung von vorhandener Infrastruktur (beispielsweise Intelligent Transportation Systems (ITS) Roadside Units). Die beteiligten Fahrzeuge bauen ein gemeinsames Umfeldmodell auf, in das Objekte von unterschiedlichen Teilnehmern

eingebraucht werden können. Dadurch ergibt sich eine möglichst genaue Abbildung der Umgebung als Planungsgrundlage. Um mit einer Planungsmethode unterschiedliche Situationen beherrschen zu können, soll die Aufgabenkoordination generisch hinsichtlich des Einsatzes in den Umgebungen (Abdecken von Autobahn, Landstraße und Stadt) und in den unterschiedlichen Eigenschaften des Verkehrs (Abdecken von Sicherheit, Komfort und Effizienz) sein. Dabei ist davon auszugehen, dass die Teilnehmer aus einer heterogenen Fahrzeugpopulation, also aus Fahrzeugen unterschiedlicher Hard- und Softwarestände, bestehen. Diese sollen am Prozess teilnehmen können, sofern sie gemeinsame Schnittstellen bedienen. Teilnehmende Fahrzeuge können sich optional an der Lösungsfindung beteiligen, da es denkbar ist, dass nicht jedes Fahrzeug mit beispielsweise derselben Rechnerleistung ausgestattet ist. Um an Unfallschwerpunkten auch infrastrukturelle Lösungsvorschläge unterbreiten zu können, soll vorgesehen werden, dass auch ein einzelner Teilnehmer alle Lösungsfindungsschritte alleine durchlaufen kann. Die Konfliktlösung beschreibt eine explizite Fahrzeugbewegung aller Teilnehmer in Form von Trajektorien unter der Randbedingung, dass die Autonomie aller Teilnehmer zu jedem Zeitpunkt gewahrt bleibt. Zudem werden Schleifen, also ständig wechselnde Entscheidungen, verhindert, damit die Lösungsfindung in einer bestimmbar Zeit abgeschlossen ist. Die Planung kann zentral oder dezentral erfolgen, je nachdem, ob sich mehrere Fahrzeuge am Lösungsprozess beteiligten wollen bzw. dürfen.

Die Anforderungen zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage sind:

1. der Einsatz von Kommunikation,
2. Fahrzeuge und Infrastruktur als Kommunikationspartner,
3. die Anwendbarkeit in allen Umgebungen (Autobahn, Landstraße, Stadt),
4. die Anwendbarkeit für Sicherheit, Komfort und Effizienz,
5. die Vernetzung heterogener Fahrzeuggruppen,
6. der Aufbau eines gemeinsamen Umfeldmodells,
7. die Möglichkeit der Alleingestaltung der Lösung (zentrale Planung),
8. die Möglichkeit der Mitgestaltung an der Lösung (Peer-Planung),
9. die Möglichkeit der gemeinschaftlichen Lösungsberechnung (dezentrale Planung).
10. die Vollständigkeit des Plans hinsichtlich Trajektorien für alle Teilnehmer,
11. die Wahrung der Autonomie in kooperativer Fahrfunktion, sowie
12. die Verhinderung von Schleifen.

### **Themenbereich 3: Fahrmanöverkoordination**

Im Rahmen der Aufgabenkoordination des fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems besteht eine Aufgabe in der Planung gemeinschaftlicher Fahrmanöver. Wie können für mehrere Teilnehmer kooperative Fahrmanöver geplant werden? Können nicht mit dem System ausgestattete Fahrzeuge berücksichtigt werden? Kann die Methode sowohl Fahrerassistenz- als auch Sicherheitsfunktionen abbilden? Kann der individuelle Fahrerwunsch Einfluss auf die kooperativen Manöver haben? Eine Methode zur Fahrmanöverkoordination soll Antworten auf diese Fragen geben.

### **Forschungsfrage 3: Welche Methode zur Fahrmanöverkoordination erlaubt das Planen von Fahrmanövern des fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems?**

Die Fahrmanöverkoordination ist die Planungsmethode des Verhaltens aller am Konflikt beteiligten Fahrzeuge. Da in einem Konflikt mit mehreren Fahrzeugen die Verhalten aller Fahrzeuge relevant sind, muss die Planungsmethode all diese Fahrzeuge gleichzeitig berücksichtigen. Um eine kollisionsfreie Auflösung zu garantieren,

werden die Fahrmanöver nicht durch allgemeine Beschreibungen des Fahrzustands (Spurhalten, Spurverlassen, Bremsen, etc.) sondern durch Trajektorien abgebildet. Da gerade in der Einführungsphase nicht ausschließlich von mit dem System ausgestatteten Verkehrsteilnehmern ausgegangen werden kann, sind *nicht beeinflussbare Teilnehmer* zu berücksichtigen. Um eine möglichst hohe Güte von Trajektorien zu erhalten, soll die Methode keinen Entkopplungen unterliegen (keine priorisierte Planung, keine Entkopplung zwischen Pfad und Trajektorie sowie zwischen Quer- und Längsplanung). Um die Notwendigkeit unterschiedlicher Planungsmethoden zu verhindern, soll die Methode generisch hinsichtlich ihres Einsatzortes (Anwendbarkeit in den Umgebungen Stadt, Landstraße, Autobahn) und hinsichtlich der Eigenschaften des Verkehrs (Sicherheit, Komfort, Effizienz) sein. In Situationen, in denen keine unfallvermeidende Planung möglich ist, wird aufgrund von ethischen und moralischen Fragestellungen auf ein Abwägen der besten Lösung verzichtet. In diesem Fall gibt die Planungsmethode keine Trajektorien aus. Um Unfälle während und nach dem Manöver zu vermeiden, werden Kollisionen für die Zeit der Durchführung (sichere Trajektorien) und für die sich anschließende Übergabe (sichere Endzustände) ausgeschlossen. Die Planung erfolgt auf Basis der Umgebung, anderer Fahrzeuge und relevanter Objekte. Damit die Planungsmethode zu plausiblen Lösungen kommt, müssen die Fähigkeiten der Fahrzeuge berücksichtigt werden. Schließlich sollen Präferenzen der beteiligten Fahrer das Ergebnis beeinflussen, damit ein möglichst zu den Fahrern passendes Manöver gefahren werden kann.

Die Anforderungen der dritten Forschungsfrage sind:

1. die Anwendbarkeit in straßengebundenen Fahrzeugen (im Straßenverkehr),
2. die Planung mehrerer Fahrzeuge,
3. die Existenz von Trajektorien für alle Teilnehmer,
4. die Berücksichtigung nicht beeinflussbarer Teilnehmer,
5. keine Entkopplung,
6. die Anwendung in allen Umgebungen,
7. die Anwendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz,
8. die Anwendung zur Unfallvermeidung,
9. die Berücksichtigung sicherer Trajektorien,
10. die Berücksichtigung sicherer Endzustände,
11. die Verwendung von Fahrzeugen und der Umgebung als Planungsgrundlage, sowie
12. die Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen und Fahrzeugfähigkeiten.

## 1.2 Wissenschaftliche Beiträge

Die wissenschaftlichen Beiträge dieser Arbeit lassen sich der Auswertung des Stands der Wissenschaft und Technik und der Beantwortung der drei Forschungsfragen zuteilen.

Der Stand der Wissenschaft und Technik

- wurde für den Bereich der straßengebundenen Fahrzeuge gesichtet und ausgewertet [57].

Zur Definition von kooperativem Verhalten

- wurden Grundeigenschaften von kooperativem Verhalten benannt und notwendige und hinreichende Bedingungen abgeleitet, die in einer Operationalisierung von kooperativem Verhalten münden [59].
- wurde der Aspekt der Berücksichtigung der vergangenen Handlungen auf zukünftiges kooperatives Verhalten eingeführt [230].

Diese werden in der vorliegenden Arbeit zu einer neuen Definition für kooperatives Verhalten vereint. Weiterhin wurde gezeigt, dass nicht jeder von kooperativem Verhalten profitiert [61, 304].

Die Aufgabenkoordination

- wurde aus einer deliberativen Steuerungsarchitektur entwickelt [80].
- wurde in unterschiedlichen Gegebenheiten angewandt [81].

Die Methode zur Fahrmanöverkoordination

- wurde erarbeitet und erste Simulationen in einer Software-in-the-Loop (SiL)-Simulationsumgebung durchgeführt [60].
- wurde in weiteren SiL-Simulationen auf die Einbeziehung von nicht beeinflussbaren Teilnehmern hin untersucht [57].
- wurde in einer Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulationsumgebung angewandt und einer Sensitivitätsanalyse bezüglich der Parametrisierung und Messungenauigkeiten unterzogen [58].

## 1.3 Struktur der Arbeit

Im ersten Kapitel werden die Forschungsfragen der vorliegenden Dissertation aufgestellt und die zugehörigen Anforderungen erläutert. Das zweite Kapitel beschäftigt sich mit der Aufbereitung des Stands der Wissenschaft und Technik zu den Forschungsfragen. Die Kapitel drei, vier und fünf beantworten die aufgestellten Forschungsfragen. Dabei konzentriert sich das dritte Kapitel auf die Herleitung und Definition von kooperativem Verhalten. Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Erarbeitung einer Methode zur Aufgabenkoordination. Das fünfte Kapitel beschreibt eine Methode zur Fahrmanöverkoordination. Im sechsten Kapitel werden Ergebnisse und Anwendungen der Methoden als Antworten auf die Forschungsfragen in Software-in-the-Loop- und Hardware-in-the-Loop-Simulationen dargestellt. Dabei werden Eigenschaften und Grenzen der Methoden diskutiert. Die vorliegende Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weitere Forschungsaspekte im siebten Kapitel. Abbildung 1.2 zeigt den Aufbau und die Struktur der Arbeit. Die Forschungsfragen bilden das Gerüst der vorliegenden Arbeit, wobei die Grafik die Behandlung der unterschiedlichen Aspekte in den Kapiteln zeigt.

Kapitel 1			Kapitel 2			Kapitel 3			Kapitel 4			Kapitel 5			Kapitel 6			Kapitel 7					
Aufstellen der Forschungsfragen			Stand der Wissenschaft und Technik			Entwicklung und Bewertung der Konzepte									Anwendungen und Ergebnisse			Zusammenfassung und Ausblick					
1	2	3	1	2	3	1		2		3		3		2		1		1		2		3	

1

 Erste Forschungsfrage

2

 Zweite Forschungsfrage

3

 Dritte Forschungsfrage

Abbildung 1.2: Drei Forschungsfragen als strukturierendes Element der Arbeit.



## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Aufbauend auf der einleitenden Motivation für das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem soll in diesem Kapitel der Stand der Wissenschaft und Technik zu den drei formulierten Forschungsfragen aufgezeigt werden.

Mittels einer in Abschnitt 2.1 beschriebenen systematischen Literaturstudie wird eine Datenbasis aufgebaut, die direkt oder indirekt die relevanten Publikationen zusammenträgt. Aus dieser Datenbasis geht für jede Forschungsfrage in Form eines Überblicks hervor, welche Methoden bereits bekannt sind. So bedient Abschnitt 2.2 die erste Forschungsfrage und zeigt die vielfältigen Verwendungen des Begriffs *Kooperation* und *kooperatives Verhalten* in unterschiedlichen Disziplinen auf. In Abschnitt 2.3 werden unterschiedliche Prozesse zur Aufgabenkoordination bezüglich der zweiten Forschungsfrage beschrieben. Abschnitt 2.4 zeigt Methoden auf, die bereits für eine Fahrmanöverkoordination eingesetzt wurden und somit den Stand der Wissenschaft und Technik zur dritten Forschungsfrage darstellen.

An die Überblickserstellung schließt sich für jede der Forschungsfragen die Herausarbeitung von Erkenntnissen an, die aus den bekannten Methoden gezogen werden können. Sie werden zusammengefasst, auf den Kern der vorliegenden Arbeit fokussiert und erlauben so eine objektive Vergleichbarkeit der Ansätze. Ferner bietet die konzentrierte Darstellung die Möglichkeit, die Anforderungen der jeweiligen Forschungsfragen mit den Eigenschaften der Ansätze zu vergleichen. Das Ergebnis dieses Abgleichs ist die Einschätzung des Beantwortungsgrads der drei Forschungsfragen. Eine Zusammenfassung in Abschnitt 2.5 stellt wichtige Erkenntnisse zusammen und schließt das Kapitel ab.

Das Kapitel hat demnach zum Ziel,

1. die systematische Literaturstudie zum Aufbau der Datenbasis des Stands der Wissenschaft und Technik zu erläutern,
2. einen umfassenden Überblick zum Stand der Wissenschaft und Technik der Forschungsfragen zu geben,
3. den Überblick in Erkenntnissen zusammenzufassen,
4. den Beantwortungsgrad der Forschungsfragen durch den Stand der Wissenschaft und Technik zu ermitteln, sowie
5. eine Einschätzung der Relevanz der Forschungsfragen abzugeben.

Auf Basis der systematischen Literaturstudie wurden Erkenntnisse bezüglich der Fahrmanöverkoordination publiziert [57].

## 2.1 Systematische Literaturstudie

Die Literatur des Stands der Wissenschaft und Technik entspringt einer nach Randolph [241] systematisch durchgeführten Literaturstudie. Sie umfasst die fünf Arbeitsschritte Formulierung des Problems, Sammlung der Literatur, Auswertung der Literatur, Analyse und Interpretation der Literatur sowie Präsentation der Erkenntnisse. Die Literatur basiert auf Veröffentlichungen nationaler und internationaler Konferenzen und Journals, die von unterschiedlichen Organisationen betreut werden.

### Formulierung des Problems

Zunächst muss die der Literaturrecherche zugrundeliegende Fragestellung erfasst werden. Es soll bei der Recherche um ein Zusammentragen des Stands der Wissenschaft und Technik zu Methoden zu kooperativen Assistenz- und Sicherheitssystemen gehen. Dabei spielt die Fachrichtung, in der diese Methoden eingesetzt werden, eine untergeordnete Rolle. Die IEEE Xplore Digital Library (<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>) dient dabei als Quelle der Suche. IEEE ist eine renommierte Organisation im Bereich der Elektronik, die in ihren Datenbanken sowohl den Stand der Technik als auch den neusten Stand der Wissenschaft abbildet. Sie umfasst Proceedings von Konferenzen und Artikel aus Journalen und unterliegt einem Auswahlverfahren (Peer-Review). Darüber hinaus beteiligt sich IEEE mit Journalen und Konferenzen aktiv bei der Gestaltung des Forschungsfelds ITS. Quellen, die in den gefundenen Veröffentlichungen zitiert werden, sowie nationale und internationale Veröffentlichungen anderer Organisationen werden dem Stand der Wissenschaft und Technik ebenfalls hinzugefügt. Datenbanken anderer Organisationen werden jedoch nicht mit der nachstehend beschriebenen Systematik durchsucht.

Die Publikationen der Datenbank werden mithilfe eines Suchstrings gefiltert, der maximal 16 Begriffe umfassen darf. Entsprechend der englischsprachigen Datenbank ist auch der Suchstring in Englisch formuliert. In einem iterativen Prozess wurde ein Suchstring nach dem Schema **A und B und C nicht D** erarbeitet. Dabei werden in den Blöcken A und B die Eigenschaften der Methoden zu kooperativen Assistenz- und Sicherheitssystemen und in Block C die möglichen Teilnehmer definiert. Block D schließt häufig gefundene irrelevante Themen aus.

In Block A werden Begriffe beschrieben, die in der Literatur als Synonyme zu *Kooperation* verwendet werden. Sie umfassen cooperation, cooperative, cooperating, collaboration, collaborative, collaborating, coordination, coordinative, coordinating, negotiation und negotiating. Um einen übersichtlichen Suchstring zu erhalten, können unterschiedliche Endungen mit einer Wildcard (\*) abgedeckt werden. Dementsprechend ergibt sich der Block A zu **cooperat\* OR coordinat\* OR negot\* OR collabor\***.

Begriffe in Block B beschreiben weitere Eigenschaften des Systems. Sie bilden zusammen mit Block A die Gesamteigenschaften des Systems ab. Zur anschaulichen Erläuterung wird nachfolgend die Eigenschaft *kooperativ* aus Block A beispielhaft verwendet. Das gesuchte System kann kooperative Manöver planen/berechnen/ausführen (cooperative maneuver), kooperativ Trajektorien planen/berechnen/folgen (cooperative trajectory) oder die Fähigkeit haben, kooperative Situationen wahrzunehmen und aufzulösen (cooperative cognitive). Im Bereich der Regelungstechnik wird auch häufig von kooperativer Steuerung (cooperative control) gesprochen. Auch ohne explizite Nennung der Methode ist diesen Systemen gemein, dass sie kooperativ Konflikte erkennen/vermeiden/auflösen (cooperative conflict). Systeme des fahrzeugtechnischen Bereichs werden in der Datenbank unter dem Begriff ITS Cooperative Driving (zu Deutsch: Kooperatives Fahren) zusammengefasst (*cooperative driving*). Diese Eigenschaften werden im Block B daher folgendermaßen zusammengefasst: **maneuver OR traject\* OR cognitive OR control OR conflict OR driving**.

Block C beschreibt die Teilnehmer der Kooperation. Es kann sich um Fahrzeuge im weitesten Sinne (vehicle) oder um Automobile (automobile, car) handeln. In englischsprachigen Veröffentlichungen werden mit dem Begriff *vehicle* eine Vielzahl verschiedenartiger Fahrzeuge und somit unterschiedliche Disziplinen abgedeckt. Außerdem werden durch die Definition von Teilnehmern rein theoretische Methoden ausgeschlossen und eine gewisse Anwendbarkeit gefordert. Somit ergibt sich Block C zu **vehicle OR automobile OR car**.

Schließlich werden in Block D Begriffe zusammengefasst, die bei der iterativen Suche als Ursache für eine Vielzahl nicht relevanter Quellen identifiziert wurden. Der Begriff *torque* bringt viele Quellen hervor, die sich mit Problemstellungen von Robotern mit begrenzten Drehmomenten beschäftigen. Auch Fahrermodelle (*driver model*) für an kooperativen Fahrmanövern beteiligte Fahrer besitzen ebenso wie Mensch-Maschine-Schnittstellen (*human\**) keine Relevanz für die hier gesuchten kooperativen Fahrfunktionen. Block D besteht somit aus **torque OR „driver model“ OR human\***.

Tabelle 2.1 fasst die Blöcke und die jeweilig zugehörigen Begriffe des Suchstrings zusammen.

### Sammlung und Auswertung der Literatur

Der definierte Suchstring schränkt die Publikationen auf 660 vermutlich relevante ein. Anhand von Auswahlkriterien wird eine detaillierte Untersuchung dieser Publikationen vorgenommen, an deren Ende 256 tatsächlich relevante Publikationen stehen. Die Kriterien umfassen eine konkrete Beschreibung eines Systems, einer Methode zur Anwendung auf das formulierte Problem und das Vorhandensein von mehr als einem Fahrzeug. Neben den 256 als relevant eingestuften Publikationen werden weitere Referenzen und Primärquellen der Literatur des Stands der Wissenschaft und Technik zugeführt. Relevante Drittquellen, die weder direkt noch indirekt Teil der systematischen Literaturstudie sind, werden ebenfalls mit aufgenommen.

Nachstehend werden die **Analyse und Interpretation der Literatur** und die **Präsentation der Erkenntnisse** für jede der drei Forschungsfragen durchgeführt.

Tabelle 2.1: Zusammenfassung und Beschreibung des Suchstrings.

	Block A	Block B	Block C	Block D
Beschreibung	Synonyme zu Kooperation	Gesamteigenschaften des Systems	Teilnehmer der Kooperation	Ausschluss von Themen
Verknüpfung		AND	AND	NOT
Inhalt	cooperat* OR coordinat* OR negot* OR collabor*	maneuver OR traject* OR cognitive OR control OR conflict OR driving	vehicle OR automobile OR car	torque OR „driver model“ OR human

## 2.2 Kooperatives Verhalten

Das Ziel dieses Abschnitts ist die Auflistung und Bewertung der Verwendbarkeit unterschiedlicher Definitionen kooperativen Verhaltens zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage. Dazu wird in Abschnitt 2.2.1 ein Überblick über die Verwendung der Begriffe *kooperatives Verhalten* und *Kooperation* verschiedener Disziplinen gegeben. Als Einstieg werden allgemeinsprachliche Definitionen im Deutschen und Englischen zitiert. Daran schließt sich eine Auflistung der Verwendung in ausgewählten, als relevant eingeschätzten, nicht technischen Bereichen an. Der Fokus dieses Abschnitts wird auf im technischen Bereich gegebene Definitionen gelegt. Ferner werden straßenverkehrliche Verwendungen im technischen Bereich gesondert herausgearbeitet. Der gewonnene Überblick wird in Erkenntnissen in Abschnitt 2.2.2 zusammengefasst. Dabei wird ein Fokus auf ableitbare Quasidefinitionen gelegt, die eigens aus einzelnen Aspekten gebildet werden. Abschnitt 2.2.3 listet Anforderungen der ersten Forschungsfrage auf, stellt einen Anforderungsabgleich mit den bekannten Definitionen von kooperativem Verhalten an und fasst die Erkenntnisse zum Stand der Wissenschaft und Technik der ersten Forschungsfrage zusammen.

### 2.2.1 Überblick

Je nach Fachrichtung und Autor werden unterschiedliche Eigenschaften von kooperativem Verhalten als wichtig identifiziert und lassen somit eine Vielzahl von Definitionsmöglichkeiten zu. Nachstehend werden Eigenschaften unterschiedlicher Fachrichtungen zusammengetragen und aufgelistet.

Nach dem Duden [158] ist die Wortbedeutung für kooperativ: bereitwillig kooperierend. Kooperation wiederum definiert der Duden als Zusammenarbeit, die besonders auf wirtschaftlichem oder politischem Gebiet stattfindet. Dabei werden als Synonyme Teamwork und Zusammenarbeit genannt. Im Englischen wird Kooperation laut Oxford Desk Dictionary & Thesaurus [223] mit positiven Eigenschaften wie miteinander arbeiten, sich zukommend verhalten und den Nutzen eines oder aller Beteiligten zu erhöhen assoziiert. Als Synonyme werden Kollaboration, Teamwork und Hilfe bzw. Unterstützung angegeben. Das Oxford Dictionary [273] beschreibt Kooperation als eine Aktion oder einen Prozess der Zusammenarbeit hin zu einem gemeinsamen Ende/Ziel. Das Wort stammt vom lateinischen Verb *cooperari* (zusammenarbeiten) ab, welches sich aus der Verknüpfung der Worte *co-* (zusammen) und *operari* (arbeiten) ergibt.

Neben der allgemeinen Sprachverwendung des Begriffs Kooperation finden sich Definitionen in unterschiedlichen Fachgebieten. Dabei werden teilweise innerhalb eines Fachgebiets unterschiedliche Definitionen kooperativen Verhaltens verwendet [67]. In der Evolutionstheorie nützt kooperatives Verhalten typischerweise den anderen, zahlt sich aber indirekt später möglicherweise wieder aus [9, 269]. Dennoch gibt es Gründe für kooperatives Verhalten wie Reziprozität und Verwandten- sowie Gruppenselektion. Daher wird Kooperation von Nowak [218] auch als Verhalten von egoistischen Individuen definiert, welche Potenzial der eigenen Fortpflanzung der gegenseitigen Hilfe opfern. In der Sonderpädagogik ist Kooperation eine allgemeine Bezeichnung für die Zusammenarbeit von Menschen und steht im Gegensatz zu Konflikt und Konkurrenz. Weiterhin werden gemeinsame Werte, Ziele und Kommunikationssysteme als wesentliche Voraussetzung für Kooperation genannt [56]. Auch hier nimmt die Reziprozität eine wichtige Rolle ein, was durch die Regel „Wie du mir, so ich dir“ verdeutlicht wird [307]. Der Begründer der modernen Konfliktforschung Deutsch [47] definiert Kooperation als positives Verhalten, welches impliziert, dass man füreinander da ist oder voneinander profitiert. Darüber hinaus setzt er eine kooperative Lösung einer Win-Win-Lösung eines Konflikts gleich. Tyler [290] definiert Kooperation als eine Entscheidung, in welchem Maß sich eine Person aktiv in einer Gruppe, Organisation oder Gemeinschaft einbringt, um dieser zu helfen, effektiv und erfolgreich zu sein. Eine Auflistung unterschiedlicher Kooperationsmerkmale in der Politikwissenschaft von Etter [67] beschreibt mit der Unabhängigkeit der Partner, der Koordination des Verhaltens und der besseren Zielerreichung als ohne Kooperation drei Merkmale der Kooperation. Im Bereich der Wirtschaft trägt Teusler [283] gängige Eigenschaften von Kooperationen zusammen, die sie in Kooperationsformen, Kooperationsbereiche und Kooperationsrichtungen unterteilt. Eine finale Definition wird

nicht gegeben. Die Spieltheorie [295] beschäftigt sich mit kooperativen und nicht kooperativen Spielen, wobei in kooperativen Spielen im Gegensatz zu nicht kooperativen Spielen verbindliche Absprachen getroffen werden können [211, 309].

Im technischen Bereich existieren Beschreibungen von kooperativem Verhalten besonders im Zusammenhang mit Agenten-Systemen. Multi-Agenten-Systeme (MAS) beschreiben die Existenz mehrerer, auch unterschiedlicher, Agenten, die in einem System zusammenkommen. Dabei wird Kooperation als Entscheidungsprozess zwischen egozentrierten Entscheidungen mit kurzfristigem, individuellem Nutzen und gemeinschaftlichen Entscheidungen mit langfristigem Gruppennutzen definiert. Neben dem meist nur kurzfristigen Nutzen können egozentrische Entscheidungen einen Nachteil haben, wenn alle Teilnehmer diese Entscheidung gleichzeitig wählen [253]. Im Gebiet der künstlichen Intelligenz werden Fragen der Zuweisung von Verantwortung für Aufgaben und dem Teilen von begrenzten Ressourcen bei gleichzeitig effektiver Zielerreichung bearbeitet [70]. Zlotkin und Rosen-schein [330] definieren Ziele, Pläne und Kosten zur Erfüllung von Plänen als Grundlage für Kooperation. Dazu stellen sie widerspruchsfreie Ziele der Agenten als notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung auf. Eine kooperative Situation ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Strategie in der Verhandlungsmenge existiert, welche die beiden Agenten deren jeweilige Ziele erreichen lässt. Hoc [120] sagt, dass komplett getrennte Aktionen von Agenten, die zusammen Aktionen durchführen, keine Kooperation darstellen. Er definiert ebenfalls eine kooperative Situation mittels zwei Minimalbedingungen: erstens muss jeder Agent ein Ziel verfolgen und sich mit anderen Agenten bezüglich Zielen, Ressourcen oder Prozessen in die Quere kommen können und zweitens versucht jeder, diese Interaktion zur einfacheren Bewältigung individueller Aktionen und/oder zur Erreichung eines gemeinsamen Ziels zu managen. Malone und Crowston [194] sprechen ebenfalls vom gemeinsamen Ziel. Für sie impliziert Kooperation typischerweise gleiche Ziele, die durch unterschiedliche Individuen erreicht werden. Weiterhin ist Kooperation eine Form von Koordination und muss neben Kollaboration und Konkurrenz als solche verstanden werden. Dem pflichtet Hübner [127] bei, indem er Kooperation als koordinierte Interaktion zwischen Agenten auffasst. Diese Handlungen finden aufgrund einer Abstimmung mittels Kommunikation statt. Narasimha [210] spricht von Kooperation durch Kommunikation zur Erreichung eines gemeinsamen Ziels bei gleichzeitiger Vernachlässigung eigener Ziele. Darüber hinaus geht für ihn Kooperation mit Verlust von Autonomie einher. Kooperative Regelung hat das Ziel, ein globales Ziel vieler autonomer Einheiten zu erreichen [197]. Individuelle Ziele werden nicht erwähnt. Es kann sogar neben der besseren Zielerreichung die Robustheit des Systems durch mehrere Agenten im Vordergrund stehen [311]. Hoc [121] fügt hinzu, dass Kooperation als eine dynamische Besonderheit einer Situation verstanden werden kann. In der kooperativen Konfliktlösung nach Schouwenaars et al. [257] wird der Austausch von Informationen, ihrer Positionen und Intentionen als kooperativ bezeichnet. „Wahre Kooperation“ zwischen Robotern bewirkt, dass Missionsziele angegangen und schnell beendet werden können [128]. Dabei geht es nach Ogras et al. [219] auch um Aufgaben, die gemeinsam effektiver als bei alleiniger Bearbeitung gelöst werden können.

Im Umfeld des Straßenverkehrs definieren Benmimoun et al. [18] kooperatives Verhalten als ein Verhalten, bei dem auf das eigene Recht verzichtet werden muss. Sie fordern zudem einen positiven Gesamtnutzen, der einer Kosten-Nutzen-Abwägung unterliegt. Darüber hinaus beeinflussen personale Faktoren die Kosten für eine kooperative Handlung. Um kooperatives Verhalten bewerten zu können, werden sowohl individuell auf den Fahrer bezogene als auch auf das Gesamtsystem Verkehr bezogene Folgen berücksichtigt. Wie schon in den nicht technischen Definitionen spielt auch für Benmimoun et al. die Reziprozität als Motivation für kooperatives Verhalten eine wichtige Rolle: „Nächstes Mal könnte ich dort stehen!“ [18]. Ellinghaus [64] beschreibt kooperatives Verhalten als Verhalten, welches auftritt, wenn mehrere Verkehrsteilnehmer das gleiche Ziel verfolgen und sich dabei gegenseitig unterstützen können. Kooperatives Verhalten hat, im Gegensatz zu altruistischem Verhalten, ein Eigeninteresse. Da die Situationen im Straßenverkehr oft intransparent sind, geht er davon aus, dass statt kooperativem Verhalten oftmals Wettbewerbsverhalten an den Tag gelegt wird. Bei kooperativem Verhalten wird der andere mit einbezogen und versucht, gemeinsam das beste Ergebnis zu erhalten. Reziprozität ist auch bei ihm ein wichtiger Aspekt. Löper und Flemisch [183] definieren Kooperation allgemein als gewinnbringende Zusammenarbeit mehrerer Partner. Franke et al. [79] spezifizieren die Zusammenarbeit als gemeinschaftlich ko-

ordiniertes Verhalten unabhängiger Verkehrsteilnehmer mit dem Sinn einer verbesserten Zielerreichung. Ziele für Kooperation sind die erhöhte Verkehrssicherheit und der verbesserte Verkehrsfluss durch mehr und zuverlässigere Informationen [274]. Dabei besteht das kooperative Verhalten im Abfahren ausgehandelter Trajektorien [274], in einem angepassten Verhalten [24] oder darin, Handlungen [127] zum Nutzen aller durchzuführen [275]. Auch das Fahren zur Optimierung eines gemeinsamen Ziels ist kooperativ [299]. Neben dem Verhalten eröffnet der Austausch von Informationen kooperatives Verhalten [24, 274]. Ein weiterer Zweig des Straßenverkehrs beschäftigt sich mit kooperativen Systemen. Diese haben beispielsweise die Optimierung des Verkehrsflusses als Ziel [4]. So zielen kooperative Lichtsignalanlagen durch Kommunikation mit anderen kooperativen Lichtsignalanlagen und Fahrzeugen auf die Steigerung der Effizienz des Verkehrsflusses ab.

Neben diesen zusammengetragenen Beschreibungen von kooperativem Verhalten bzw. Kooperation gibt es viele Veröffentlichungen, die kooperatives Verhalten oder Kooperation nicht näher definieren. So wird das Kooperative weder beim kooperativen Patrouillieren [231], noch beim kooperativen Trajektorien-Mapping [35] erläutert. Außerdem wird kooperatives Verhalten abstrakt als angemessenes Verhalten beschrieben [291].

### 2.2.2 Erkenntnisse

Allgemeine Begriffe wie *kooperatives Verhalten* und *Kooperation* finden breite Verwendung in der Alltags- und Fachsprache. Die Verwendung kann in eine allgemeinsprachliche Verwendung (A), eine nicht technische Verwendung (N), eine technische Verwendung (T) und eine straßenverkehrliche Verwendung (V) unterteilt werden. Für diese werden im Folgenden Quasidefinitionen von kooperativem Verhalten formuliert, welche die in der Literatur gefundenen Eigenschaften zusammenfasst. Die Quasidefinitionen, nachfolgend als „Definition“ bezeichnet, ermöglichen den Vergleich untereinander, da sie in einem einheitlichen Format beschrieben werden können.

In der allgemeinsprachlichen Verwendung (A) wird die Zusammenarbeit in allen Vorschlägen thematisiert. Weiterhin wird diese Zusammenarbeit im Oxford Desk Dictionary & Thesaurus um das Ziel erweitert: Die Steigerung des Nutzens eines oder aller Beteiligten. Ob die Zusammenarbeit zu einem gemeinsamen Ziel hin geschehen muss, bleibt offen. Als Definition kann dementsprechend zusammengefasst werden:

„Definition A1“ Ein Verhalten wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn eine *Zusammenarbeit zur Steigerung des Nutzens* eines oder *aller Beteiligten* zum Erreichen eines *Ziels* vorliegt.

Die nicht technische Verwendung (N) bringt Definitionen von kooperativem Verhalten bzw. von Kooperation in vielen unterschiedlichen Disziplinen zusammen. Daher gibt es eine höhere Diversität in den Definitionen. So nutzt kooperatives Verhalten in der Evolutionstheorie typischerweise ausschließlich den anderen, welches sich nur durchgesetzt hat, weil die Reziprozität eine wichtige Rolle einnimmt.

„Definition N1“ Ein Verhalten wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn ein auf *Reziprozität* basierendes Verhalten zum *Nutzen des Schwächeren* vorliegt.

Die gefundene Definition der Sonderpädagogik, die Kooperation allgemein als Zusammenarbeit von Menschen beschreibt, ist durch Definition A1 bereits beschrieben. Ein neuer Aspekt ist das aus der modernen Konfliktforschung extrahierte Merkmal von Kooperation, welches Kooperation als positives Verhalten und als Win-Win-Situation bezeichnet.

„Definition N2“ Ein Verhalten wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn durch ein *positives Verhalten* zwei oder mehr *Individuen* in einer *Win-Win-Situation* voneinander profitieren.

Ein weiteres Merkmal beschreibt die aktive Einbringung einer Person in die erfolgreiche und effektive Bewältigung von Herausforderungen einer Gruppe. Dieses Merkmal von Tyler erweitert die vorstehenden Definitionen nicht und wird daher nicht aufgenommen. Anders verhält es sich mit den Beschreibungen der Politikwissenschaften: Die drei Merkmale Unabhängigkeit der Partner, Koordination des Verhaltens und bessere Zielerreichung als ohne Kooperation münden in einer eigenen Definition.

„Definition N3“ Ein Verhalten wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn durch ein *koordiniertes Verhalten* zwei oder mehr unabhängige *Individuen* eine *bessere Zielerreichung* als *ohne Kooperation* erzielen.

Die Definitionen der Wirtschaft und der Spieltheorie erlauben keine weitere Definition von kooperativem Verhalten bzw. Kooperation.

Die technische Verwendung (T) lässt ebenfalls mehrere Definitionen von kooperativem Verhalten zu. Dabei wird für MAS der Entscheidungsprozess zwischen egozentrierten und gemeinschaftlichen Entscheidungen als Kooperation definiert.

„Definition T1“ Ein Verhalten eines Agenten wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn durch einen Entscheidungsprozess zwischen *egozentrierten* und *gemeinschaftlichen* Entscheidungen *abgewogen* wird.

Im Bereich der künstlichen Intelligenz werden hingegen die Zuweisung von Aufgaben und das Teilen von begrenzten Ressourcen bei effektiver Zielerreichung als Kooperation bezeichnet. Diese Merkmale entsprechen Definition N3 und werden daher nicht erneut aufgenommen. Dementgegen sind die Ziele, Pläne und Kosten sowie die widerspruchsfreien Ziele von Agenten und eine kooperative Situation Neuerungen, die von Zlotkin und Rosenschein eingebracht werden.

„Definition T2“ Ein Verhalten eines Agenten wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn es sich in einer *kooperativen Situation* um ein Verhalten innerhalb eines *Plans* handelt, welcher bestimmte *Kosten* aufweist, und die *beteiligten Agenten widerspruchsfreie Ziele* erreichen lässt.

Hoc definiert statt einem kooperativen Verhalten eine kooperative Situation. Diese besteht aus Zielen für jeden Agenten, einer möglichen Wechselwirkung bezüglich dieser Ziele mit den anderen Agenten sowie dem Managen dieser Interaktion zur einfacheren Erreichung der individuellen oder gemeinsamen Ziele. Malone und Crowston sowie Hübner beschreiben Kooperation als eine Form von Koordination unterschiedlicher Individuen, die gleiche Ziele verfolgen. Somit stützen alle drei die Definition N3, mit der Besonderheit bei Hübner, dass Kommunikation als Abstimmungsmedium eingeführt wird. Anderer Meinung ist Narasimha, der Kooperation als Kommunikation zur Erreichung eines gemeinsamen Ziels bei gleichzeitiger Vernachlässigung eigener Ziele beschreibt. Somit ist Definition T3 in einem Punkt ähnlich zu Definition N1, da auch hier vom Unterordnen des eigenen Ziels die Rede ist. Dabei kann nach Ogras auch die bessere Zielerreichung im Team verfolgt werden.

„Definition T3“ Ein Verhalten eines Agenten wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn *durch Kommunikation* die *Erreichung eines gemeinsamen Ziels* über der Erreichung *eigener Ziele* steht.

Im Bereich der straßenverkehrlichen Verwendung (V) definieren Benmimoun et al. kooperatives Verhalten als Verhalten, welches mit einem Verzicht auf das eigene Recht beschrieben werden kann. Dazu werden ein positiver Gesamtnutzen auf Basis einer Kosten-Nutzen-Abwägung und die Reziprozität eingeführt.

„Definition V1“ Ein Verhalten wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn ein Verhalten beim *Verzicht auf das eigene Recht* einen *positiven Gesamtnutzen* hervorruft. Dabei wird von *Reziprozität* ausgegangen.

Die Definitionen von Ellinghaus, Löper und Flemisch und Franke et al. bringen neben den bereits in Definition A1, N3 und V1 beschriebenen Eigenschaften keine neuen hervor. Die Ziele des kooperativen Verhaltens bzw. der Kooperation werden teilweise genauer spezifiziert. So können Ziele eine erhöhte Verkehrssicherheit, ein verbesserter Verkehrsfluss oder mehr und zuverlässigere Informationen sein. Auch das Abfahren von abgestimmten

Trajektorien und Handlungen oder die Anpassung des Verhaltens zum Nutzen aller ist kooperativ. Diese Eigenschaften lassen sich jedoch bereits durch die Überbegriffe Nutzen und Ziel bzw. Zielerreichung überschreiben und benötigen daher keine neue Definition.

Tabelle 2.2 stellt abschließend alle Definitionen wertungsfrei zusammen und zeigt die unterschiedlichen Eigenschaften auf. Dabei wird die Übersicht in die vier Gruppen Nutzen, Ziele, Verhalten und Szene geteilt. Haken stehen für das Vorhandensein der Eigenschaft, Kreuze widersprechen ihr. Die Einordnung in die Gruppen erfolgt auf Basis der in den jeweiligen Veröffentlichungen verwendeten Begriffe, daher können inhaltliche Doppelungen (beispielsweise die *Steigerung des Nutzens aller* im Vergleich zu *positiver Gesamtnutzen*) nicht ausgeschlossen werden. Die Auflistung zeigt, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen existiert, bei denen verschiedene Eigenschaften eine Rolle spielen. Eine einheitliche Definition lässt sich weder zur allgemeinen Verwendung noch zur Verwendung im technischen Bereich ableiten.

Tabelle 2.2: Zusammenfassung der Eigenschaften der Definitionen kooperativen Verhaltens.

Eigenschaften		„Definition“							
		A1	N1	N2	N3	T1	T2	T3	V1
Nutzen	Steigerung des Nutzens eines Einzelnen	✓							
	Steigerung des Nutzens des Schwächeren		✓						
	Steigerung des Nutzens aller	✓		✓					
	positiver Gesamtnutzen								✓
Ziele	bessere Zielerreichung				✓				
	Erreichung gemeinsamer Ziele							✓	
	alle Agenten erreichen ihr Ziel						✓	×	
	gemeinsames Ziel							✓	
	widerspruchsfreie Ziele						✓		
Verhalten	Zusammenarbeit	✓							
	positives Verhalten			✓					
	Verzicht auf das eigene Recht								✓
	Verhalten innerhalb eines Plans						✓		
	koordiniertes Verhalten				✓				
	Abwägung zwischen gemeinschaftlichen und egozentrierten Entscheidungen					✓			
	basiert auf Reziprozität		✓						✓
Szene	Kommunikation							✓	
	kooperative Situation						✓		
	zwei oder mehr Beteiligte			✓	✓				

### 2.2.3 Beantwortungsgrad der Forschungsfrage und Zusammenfassung

Es gibt unterschiedliche, teils widersprüchliche Quasidefinitionen für kooperatives Verhalten. Mittels eines tabellarischen Vergleichs soll überprüft werden, inwieweit sich die erste Forschungsfrage mit diesen Quasidefinitionen beantworten lässt. Dazu werden die Quasidefinitionen mit den Anforderungen aus Abschnitt 1.1 verglichen. Eine erfüllte Anforderung wird mit einem Haken versehen. Tabelle 2.3 zeigt die Gegenüberstellung der Quasidefinitionen mit den Anforderungen.



Tabelle 2.3: Gegenüberstellung von Anforderungen und bekannten Definitionen kooperativen Verhaltens.

Anforderungen	„Definition“							
	A1	N1	N2	N3	T1	T2	T3	V1
notwendige Situation						✓		
Nennung der Beteiligten und deren Interaktionen			✓	✓				
Steigerung des Gesamtnutzens/ Verringerung der Gesamtkosten								✓
gezieltes Verhalten								
Reziprozität		✓						✓

Die Tabelle zeigt, dass die Anforderungen der *Nennung der Beteiligten und deren Interaktionen* und die *Reziprozität* von jeweils zwei Definitionen aufgegriffen werden. Die *notwendige Situation* und die *Steigerung des Gesamtnutzens bzw. Verringerung der Gesamtkosten* wird von jeweils einer Definition genannt. Keine der Definitionen beinhaltet die Notwendigkeit eines *gezielten Verhaltens*.

Auf einzelne Definitionen geschaut ergibt sich, dass die Definitionen A1, T1 und T3 keine der Anforderungen erfüllen. Die Definition A1 forciert die Steigerung des Nutzens eines Einzelnen oder aller, was nicht der Anforderung der Steigerung eines Gesamtnutzens entspricht. Weiterhin wird von der Zusammenarbeit und der Verfolgung eines möglicherweise gemeinsamen Ziels gesprochen. Den Kern von Definition T1 stellt der Entscheidungsprozess zwischen egozentrierten und gemeinschaftlichen Entscheidungen dar. Dieser entspricht keiner der Anforderungen. Auch Definition T3 erfüllt keine der Anforderungen, da diese Definition Schwerpunkte auf die Kommunikation und das Priorisieren von gemeinsamen zum Nachteil eigener Ziele legt. Eine Anforderung wird von den Definitionen N1, N2, N3 und T2 erfüllt. Die Definitionen N2 und N3 nennen die Beteiligten und die Interaktion zwischen ihnen und erfüllen diesen Punkt somit. Definition T2 beinhaltet die Beschreibung einer kooperativen Situation während Definition N1 die Reziprozität nennt. Definition V1 erfüllt mit zwei von fünf Anforderungen die meisten. Es handelt sich um die Steigerung des Gesamtnutzens und die Berücksichtigung von Reziprozität.

Es bleibt festzuhalten, dass keine der bekannten Definitionen die Anforderungen erfüllt. Entsprechend dieser Erkenntnis bleibt die erste Forschungsfrage nach einer Definition für kooperatives Verhalten relevant. In Kapitel 3 wird auf Basis der Anforderungen eine neue Definition für kooperatives Verhalten entwickelt.

## 2.3 Aufgabenkoordination mehrerer Teilnehmer

Dieser Abschnitt hat die Auflistung und Bewertung unterschiedlicher Steuerungsarchitekturen zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage nach einer Aufgabenkoordination zur Verwendung im fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem zum Ziel. Hierfür wird in Abschnitt 2.3.1 ein Überblick über die Ideen und bereits in Verwendung befindlichen Steuerungsarchitekturen gegeben. Die Architekturen werden einzeln beschrieben und jede wird mittels eines Schaubildes illustriert. Anschließend werden die Eigenschaften der vorgestellten Architekturen in Abschnitt 2.3.2 in Erkenntnisse überführt. Dazu werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgearbeitet. Abschnitt 2.3.3 umfasst einerseits den Abgleich der Anforderungen der zweiten Forschungsfrage mit den bekannten Methoden und fasst andererseits die Erkenntnisse zusammen.

### 2.3.1 Überblick

Automatische Vehikel lassen sich mit unterschiedlichen Kontrollparadigmen steuern. In Abschnitt A.1 des Anhangs befindet sich eine Übersicht über die vier bekannten Steuerungsarchitekturen. Bei der Interaktion von Fahrzeugen gibt es unterschiedliche Ausprägungen der Kontrollparadigmen. Diese wurden meist aus dem Feld der Robotik oder der Distributed Artificial Intelligence (DAI) abgeleitet. Ein Überblick über in diesen Gebieten verwendete Architekturen geben Hallé et al. [110]. Weitere Lösungen in fahrzeugfremden Gebieten können der Literatur entnommen werden [106, 219, 315].

Im Folgenden wird auf fünf Steuerungsarchitekturen des Kooperativen Fahrens eingegangen. Diese folgen einem Kontrollparadigma mit starker oder ausschließlich deliberativer Ausrichtung. Dies ist der Berücksichtigung von Hintergrundwissen (Straßenverkehrsordnung (StVO), Objekte/Hindernisse und Fahrbahntopologie) und der nachvollziehbaren, sicheren Entscheidung geschuldet [258]. Es handelt sich um die Architekturen des Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)-Projektes, der Demo 2000, des Auto21-Projekts, des Sonderforschungsbereichs/Transregio 28 „Kognitive Automobile“ (SFB/TR 28), sowie um einen Vorschlag von Derek Caveney.

Die Architekturen wurden für unterschiedliche Anwendungsfälle des Kooperativen Fahrens entwickelt und kommen dementsprechend zum Einsatz. Die PATH-Architektur wurde für ein automatisiertes Autobahnsystem entwickelt und ist für diese Umgebung bestens geeignet. Auch die Demo 2000-Architektur wurde, wie die aus den beiden vorgenannten Architekturen entstandene Auto21-Architektur, mit dem Ziel des optimierten Platoonfah-

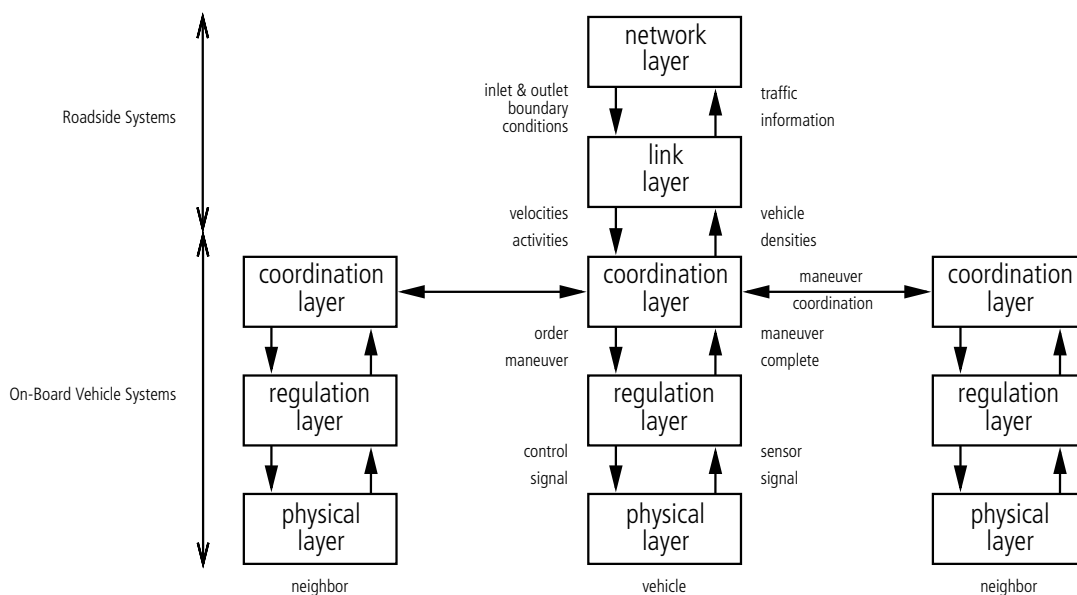


Abbildung 2.1: Systemebenenmodell der PATH-Architektur [123].

rens auf Autobahnen entwickelt. Dabei spielen autobahnuntypische Ereignisse keine Rolle. Anders sieht es mit der Architektur des Sonderforschungsbereich/Transregio 28 „Kognitive Automobile“ (SFB/TR 28) und der von Caveney aus. Diese wurden mit dem Ziel einer umgebungsunabhängigen Anwendung entwickelt. Die fünf Architekturen werden nachstehend vorgestellt und erläutert.

Die älteste aus dem Fahrzeugumfeld bekannte Architektur wurde im PATH-Projekt erarbeitet. Dabei war es das Ziel, eine Steuerungsarchitektur für ein automatisiertes Autobahnssystem (Automated Highway System (AHS)) zu erarbeiten. Die Architektur ist in fünf Systemebenen unterteilt, die sich wiederum auf das Fahrzeug und auf die Infrastruktur aufteilen und in Abbildung 2.1 gezeigt sind. Infrastrukturseitig sind die Systemebenen *network layer* und *link layer* untergebracht. Der *network layer* überwacht einmündenden Verkehr und den Verkehrsfluss innerhalb des Verkehrsnetzes. Weiterhin leitet er Maßnahmen zur Aufrechterhaltung bzw. zur Verbesserung des Verkehrsflusses ab. Die Systemebene des *link layer* setzt sich aus der Steuerung einzelner Segmente zusammen, die jeweils für ein zwischen 0,5 bis 5 km langes Teilstück des Highways verantwortlich sind. Innerhalb eines jeden Segments sollen der Verkehrsfluss maximiert und nachteilige Effekte wie Stau minimiert werden. Die Steuerung der Segmente wird von den Maßnahmen des *network layer* unterstützt. Mit anderen Worten heißt das, dass die infrastrukturellen Systemebenen für die Aufrechterhaltung des automatischen Autobahnverkehrs verantwortlich sind. Fahrzeugseitig sind die drei Systemebenen *coordination layer*, *regulation layer* und *physical layer* untergebracht. Der *coordination layer* erlaubt die Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und anderen Fahrzeugen bzw. der Infrastruktur. Die Infrastruktur übermittelt mittels des *link layer* eine Liste von geplanten Manövern (activity plan), welche der *coordination layer* mit den umliegenden Fahrzeugen koordiniert. Weiterhin ist er für die Auswahl, den Abbruch oder die Fortsetzung des Manövers verantwortlich. Diese Entscheidungen werden vom *regulation layer* mittels einer getrennten Längs- und Quersteuerung umgesetzt. Entscheidungen umfassen Manöver, die beispielsweise den Anschluss an ein bestehendes Platoon, das Verlassen eines Platoons oder den Fahrstreifenwechsel eines Platoons betreffen. Der *physical layer* fasst die bestehenden Steuerungen physikalischer Komponenten zusammen und macht sie kontrollierbar für den *regulation layer*. Somit bleibt festzuhalten, dass die fahrzeugseitigen Systemebenen die individuelle Kontrolle der Fahrzeuge und die Koordination der Fahrzeuge untereinander sowie mit der Infrastruktur sicherstellen. [116, 123, 294]

Auf die PATH-Architektur folgt die Demo 2000-Architektur, welche das Platooning als Anwendungsfall adres-

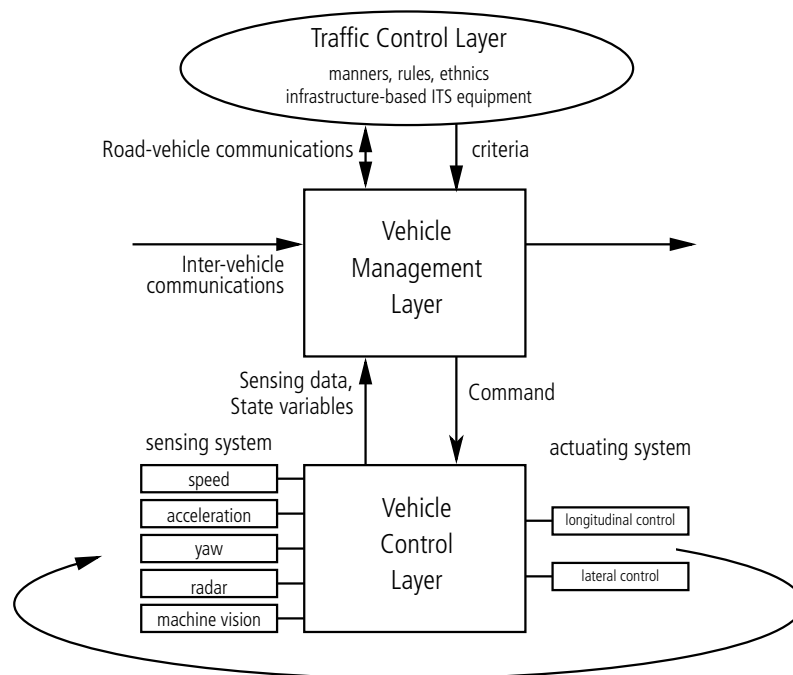


Abbildung 2.2: Architektur der Demo 2000 [288].

siert. Sie besteht aus drei Systemebenen, von denen zwei fahrzeugseitig und eine infrastrukturseitig untergebracht sind. Der Aufbau wird in Abbildung 2.2 gezeigt. Der *Traffic Control Layer* läuft auf der Infrastruktur ab und bündelt einerseits die physikalischen Eigenschaften, die Hardware und den Zugriff auf diese und verwaltet andererseits Regeln, Verhaltensgrundsätze und Gesetze und verteilt diese unter den Fahrzeugen. Diese werden vom *Vehicle Management Layer* entgegengenommen und mit den geplanten Manövern kombiniert. Der Austausch der Daten wird mittels Vehicle-to-X-Kommunikation (V2X) realisiert. Auf Grundlage der Datenlage entscheidet der Layer unter den gegebenen Randbedingungen, welches Manöver durchgeführt werden soll. Neben der Kommunikation mit der Infrastruktur können die Fahrzeuge auch untereinander kommunizieren. Der *Vehicle Control Layer* verwaltet die Sensoren und steuert die Fahrzeugaktuatorik an. Die wahrgenommenen Fahrzeug- und Umgebungszustände gibt er an den *Vehicle Management Layer* weiter. Die zurückkommenden Kommandos setzt der *Vehicle Control Layer* in Form von Fahrzeugbewegungen mittels der Aktuatorik um. Die vorgestellte Architektur wurde an Beispielfunktionen auf einem abgesicherten Testgelände erprobt und unter anderem für die Fälle des Platooning für geeignet befunden. [288]

Eine auf dem PATH- und dem Demo 2000-Ansatz basierende Architektur wurde im Auto21-Projekt entwickelt. Die Struktur der Steuerungsarchitektur ist in Abbildung 2.3 gezeigt. Sie besteht aus drei Systemebenen, dem *Guidance Layer*, *Management Layer* und dem *Traffic Control Layer*. Der *Traffic Control Layer* beschreibt die Kommunikation der Fahrzeuge mit straßenseitiger Infrastruktur. Dabei werden aktuelle Verkehrsinformationen von der Infrastruktur auf die Fahrzeuge übertragen. Diese können Verhaltensweisen, Regeln und ethische Grundsätze beinhalten. Somit kann dieser Layer direkt oder indirekt das Verhalten der Verkehrsteilnehmer beeinflussen. Der *Management Layer* hat die Aufgabe, kostenoptimale Manöver innerhalb und über ein Platoon von Fahr-

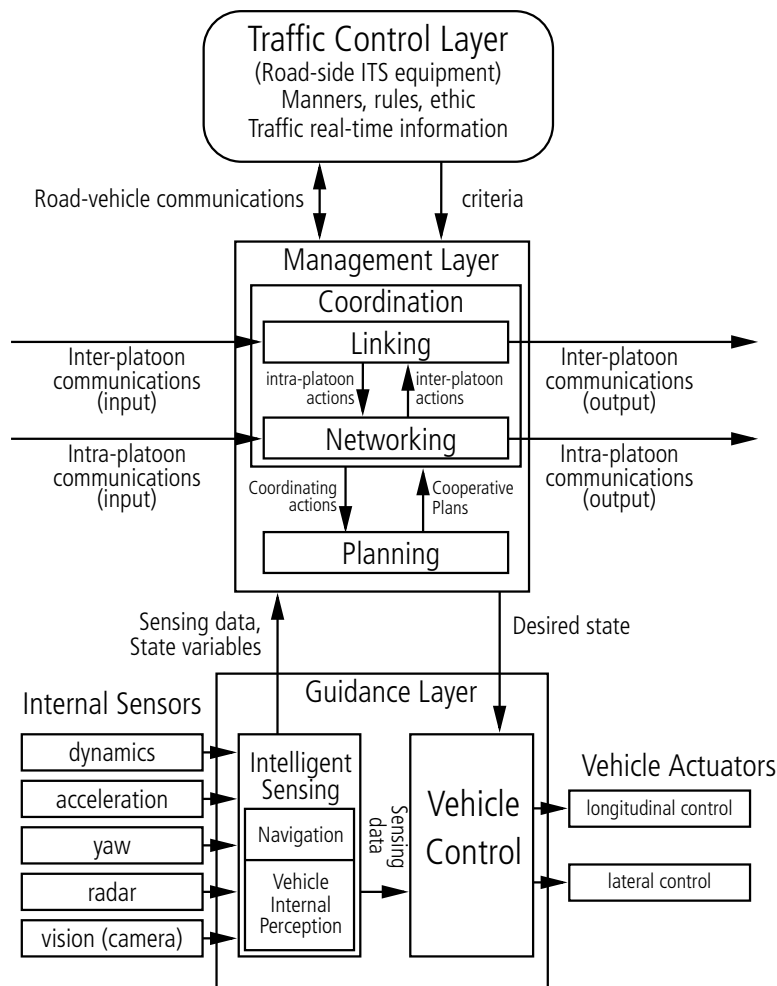


Abbildung 2.3: Architektur des Auto21-Projekts [111].

zeugen hinweg zu bestimmen und zu verteilen. Diese Aufgaben werden in den *Coordination* und *Planning* Sublayern bearbeitet. Weiterhin können Fahrzeuge über die Kommunikationsschnittstelle innerhalb und über das Platoon hinweg miteinander kommunizieren. Der *Guidance Layer* fasst die Wahrnehmung und die Steuerung der Fahrzeuge zusammen. Dabei werden einerseits Sensordaten zur Verfügung gestellt und andererseits eine fahrzeugindividuelle Verarbeitung der vorhandenen Daten vorgenommen. Je nach Ausprägung der Architektur sind zentrale und dezentrale Ausführungsformen möglich. Dabei wird entweder ein Koordinator als zentrale Instanz zur Anweisung des Manövers oder ein gleiches Wissen innerhalb des Platoons vorausgesetzt. [110, 111]

Eine als Systemarchitektur bezeichnete, deliberative Steuerungsarchitektur wurde zur Koordination mehrerer Fahrzeuge im SFB/TR 28 vorgeschlagen und ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Dabei werden zunächst Fahrzeuge zu sogenannten kooperativen Gruppen aggregiert. Diese bauen im Anschluss ein gemeinsames Lagebild auf, auf dessen Basis eine Verhaltensplanung durchgeführt wird. Die Verhaltensplanung kann von einem Fahrzeug oder mehreren Fahrzeugen parallel ausgeführt werden. Für den zweiten Fall ist jedoch ein identisches Lagebild unabdingbar. Der kooperative Plan wird dann per Funk als Handlungsanweisung an die Einzelfahrzeuge verteilt und führt zu einer Verhaltensausführung in den beteiligten Fahrzeugen. Die vorgeschlagene Architektur wurde in einer gesonderten Ausführungsform, bei der ein Gruppenkoordinator bestimmt wurde und keine dezentrale Berechnung stattfand, simuliert. [84]

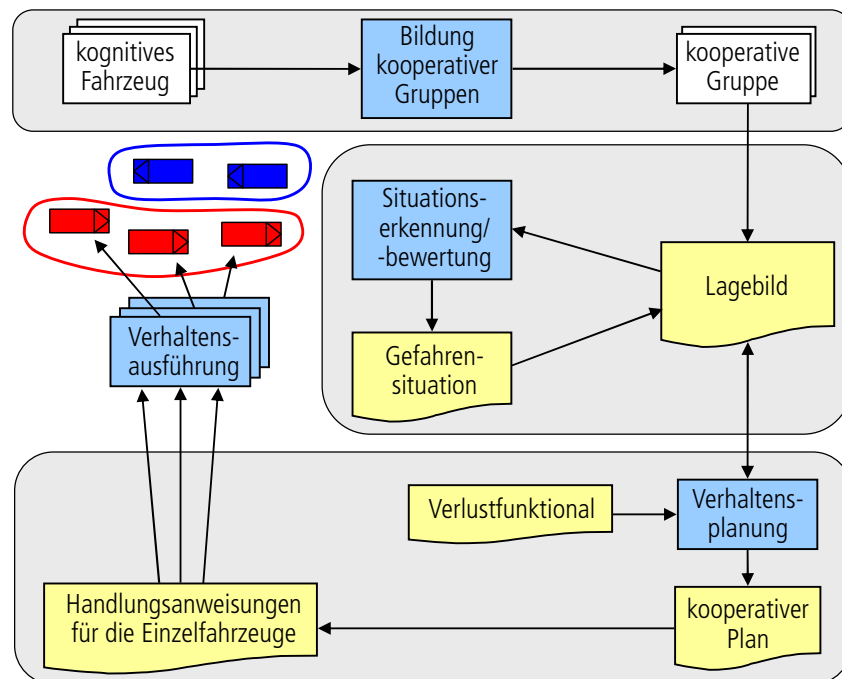


Abbildung 2.4: Systemarchitektur des SFB/TR 28 [84].

Caveney schlägt eine hybride Steuerungsarchitektur vor, die in jedem Fahrzeug aus den drei Modulen *Guidance*, *Control* und *Navigation* besteht. Der hybride Aufbau ist in Abbildung 2.5 illustriert und beinhaltet die deliberativen Teile Sensierung, Planung und Durchführung, wobei die Planung mit der Durchführung über ein reaktiv intervenierendes Sicherheitsmodul verbunden wird. Das *Guidance* Modul berechnet Trajektorien basierend auf Fahrzeug- und Umgebungseigenschaften sowie der Kooperation zwischen Fahrzeugen. Die Kooperation kann innerhalb einer definierten Gruppe oder über diese Gruppe hinaus stattfinden. Das *Control* Modul nimmt die berechneten Trajektorien an und ändert diese gegebenenfalls zur Verhinderung von sicherheitskritischen Fahrzuständen. Außerdem steuert es die Fahrzeugaktuatorik an. Das *Navigation* Modul baut ein Umgebungsmodell auf Basis der Sensorik inklusive der Kommunikation mit anderen Fahrzeugen und Infrastruktur auf. Kooperative Funktionen sind nicht Teil dieser Architektur und können von externer Stelle auf die einzelnen Module zugreifen. Den Fahrzeugen stehen eventbasierte sowie hoch-, mittel- und niederfrequente Kommunikationskanäle zum In-

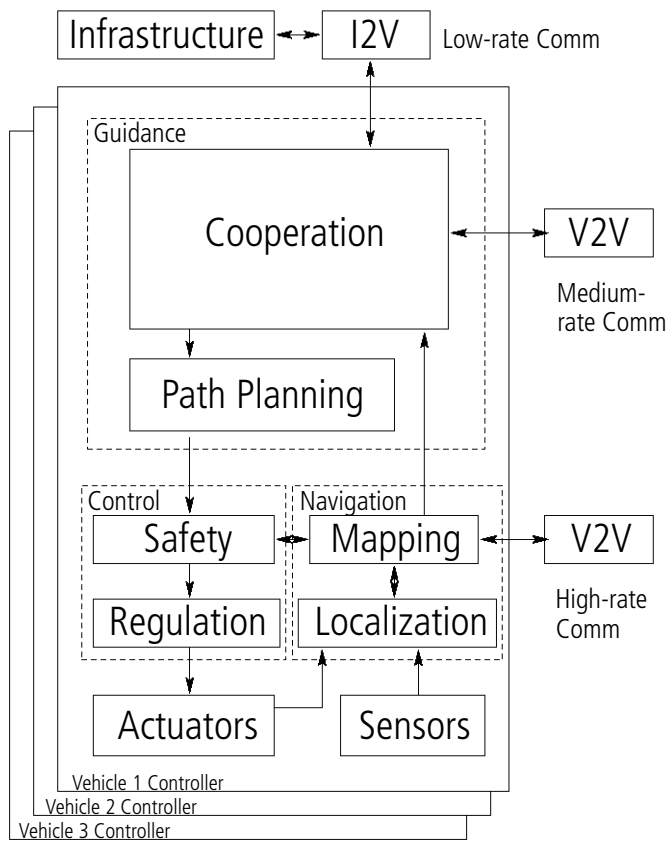


Abbildung 2.5: Architektur von Caveney [32].

formationsaustausch zur Verfügung. So können die Fahrzeuge Informationen bezüglich des Navigations- und Sicherheitsmoduls mit einer verhältnismäßig hohen Frequenz untereinander austauschen (einmal pro Sekunde). Planung und Kooperationsmodule sind mit einer mittelfrequenten Kommunikation versehen (einmal pro zehn Sekunden), während Informationen von straßenseitiger Infrastruktur zu den Fahrzeugen niederfrequent übermittelt werden (einmal pro fünf Minuten). Mit dieser Architektur sollen sowohl eigenständige Sicherheits- und Komfortfunktionen als auch kooperative Sicherheits-, Komfort- und Mobilitätsfunktionen umgesetzt werden können. [32]

### 2.3.2 Erkenntnisse

Die fünf vorgestellten Steuerungsarchitekturen des Kooperativen Fahrens werden in diesem Abschnitt auf ihre Eignung für den Einsatz in einem fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem hin untersucht. Dazu werden die Eigenschaften der unterschiedlichen Lösungsansätze zusammengetragen. Eigenschaften betreffen die Verwendung von Kommunikation, die möglichen Anwendungsbereiche, die Berücksichtigung der Beibehaltung der Autonomie, die Umfeldmodellierung und die Planung kooperativer Funktionen.

Alle fünf Architekturen beschreiben den Einsatz der Kommunikation zur Koordinierung von Fahrzeugen auf der Straße. Dabei wird der Kommunikation ein unterschiedliches Gewicht zugemessen. Die PATH-, Demo 2000- und Auto21-Architekturen fokussieren sich auf den Informationsaustausch zwischen Infrastruktur und den Fahrzeugen (Infrastructure-to-Vehicle-Kommunikation (I2V)). Bei allen drei Architekturen wird auch eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen (V2V) zugelassen, diese ist jedoch von niedrigerer Priorität. Anders sieht dies bei der Architektur des SFB/TR 28 und der von Caveney aus. Diese nutzen die Kommunikation primär, um ein abgestimmtes Verhalten zwischen den Fahrzeugen zu erzeugen. Beim SFB/TR 28 wird die Infrastruktur, im Gegensatz zu Caveneys Vorschlag, nicht explizit einbezogen. Der Inhalt des Informationsaustausches zwischen den Fahrzeugen wird von Caveney nicht konkret beschrieben, es wird jedoch kein Kommunikationspartner ausgeschlossen

(V2X). Bei der PATH-Architektur wird der Inhalt mit der Koordination der Fahrzeuge (*maneuver coordination*) umschrieben. Die Demo 2000- und Auto21-Architekturen machen bezüglich der zur Koordination ausgetauschten Informationen keine Angabe, sondern nur dazu, wer an der Koordination teilnimmt. Es gibt die Kommunikationskanäle *inter-vehicle* bzw. *inter-platoon* und *intra-platoon communication*. Die Architektur des SFB/TR 28 beschreibt explizit den Inhalt der Nachrichten als *Handlungsanweisungen für die Einzelfahrzeuge*. Hinsichtlich der Kommunikationshäufigkeit ordnet Caveney der Sicherheit, der Effizienz und dem Komfort unterschiedliche Abstraten zu. Bei den anderen Vorschlägen wird die Kommunikationshäufigkeit nicht thematisiert.

Wegen der umgebungs- und eigenschaftenspezifischen Entwicklung der Architekturen weisen diese unterschiedliche Eigenschaften auf. Die PATH-, Demo 2000- und Auto21-Architekturen zielen auf ein effizientes und komfortables Fahren auf der Autobahn ab. Daher sind zentrale, infrastrukturelle Vorschläge unter Berücksichtigung des umliegenden Verkehrs möglich. Eine zentrale Einrichtung kennt den aktuellen Status besser als jeder einzelne Teilnehmer und kann daher die Wechselwirkungen der Teilnehmer besser abschätzen. Die Architektur des SFB/TR 28 zielt auf die Auflösung einer sicherheitskritischen Situation ab und adressiert Komfort und Effizienz nur untergeordnet. Caveney schlägt einen hierarchischen Aufbau der Steuerungsarchitektur vor, mit dem sich sowohl die Auflösung sicherheitskritischer Situationen als auch Komfort und Effizienz durch unterschiedliche Prioritäten umsetzen lassen.

Ein weiterer Aspekt ist die Autonomie der Fahrzeuge, die durch die Architektur verbunden werden. So spielt der Autonomiegedanke beim Architekturvorschlag von Caveney eine wichtige Rolle. Es werden sowohl fahrzeugindividuelle als auch gemeinschaftliche Fahrfunktionen ermöglicht. Das bedeutet, dass Fahrzeuge neben der kooperativen Ausprägung auch immer eine fahrzeugindividuelle Fahrfunktion nutzen können. Die Autonomie innerhalb einer kooperativ durchgeführten Fahrfunktion wird hingegen nicht diskutiert. Bei den PATH-, Demo 2000- und Auto21-Architekturen wird der Fokus auf die gemeinschaftlichen Manöver gelegt. Die fahrzeugindividuellen Fahrfunktionen sind durch die Architektur abbildbar, werden aber nicht thematisiert. Bei kooperativ durchgeführten Fahrmanövern, die von der Infrastruktur vorgeschlagen werden, kann eine fahrzeugindividuelle Validierung zu dem Schluss kommen, dass das Manöver nicht durchgeführt werden soll. Die Autonomie innerhalb einer kooperativen Fahrfunktion ist somit gegeben. Anders sieht es beim Vorschlag des SFB/TR 28 aus: eine fahrzeugindividuelle Fahrfunktion ist ebenso nicht vorgesehen wie eine Validierung der Handlungsanweisungen an die Fahrzeuge. Es wird davon ausgegangen, dass alle Umgebungs- und Fahrzeugparameter zum Zeitpunkt der Planung feststehen und sich bis zur Durchführung des Manövers nicht ändern.

Der Autonomiegedanke hängt stark mit der zeitlichen Verwendung der Architektur zusammen. Caveney geht davon aus, dass die Steuerungsarchitektur gleichzeitig den fahrzeugindividuellen und den kooperativen Modus abdecken muss. In anderen Worten heißt das, dass diese Architektur keine Anpassungen für einen autonomen oder einen kooperativen Modus benötigt, es handelt sich also um eine kontinuierliche Verwendung. Gleichzeitig wird die kooperative Funktion nicht als Teil der Architektur verstanden: Sie kann auf die Komponenten der Architektur zugreifen und so die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen. Ein ähnliches Konzept verfolgen die PATH-, Demo 2000- und Auto21-Architekturen. Sie lassen den Betrieb von kooperativen und fahrzeugindividuellen Funktionen zu, obgleich der Fokus nicht auf die fahrzeugindividuellen Funktionen gelegt wird. Die Architektur wird durch das Befahren eines gesicherten Autobahnnetzes aktiviert und ist somit semi-eventgetrieben. Ein Teil der Architektur des SFB/TR 28 läuft im Hintergrund kontinuierlich mit. Es werden kontinuierlich Gruppen gebildet, um im Falle einer sicherheitskritischen Situation bereits die Kooperationspartner zu kennen. Der sich anschließende Teil der Konfliktlösung hingegen ist eventgetrieben. Er wird durch die Detektion einer gefährlichen Situation ausgelöst. Dies erklärt auch die Abwesenheit von fahrzeugindividuellen Fahrfunktionen: Diese werden im Rahmen der vorgeschlagenen Architektur nicht ausgelöst und durchgeführt.

Weiterhin wird in allen fünf Vorschlägen von homogenen Fahrzeugpopulationen bzw. -gruppen, also hinsichtlich des Aufbaus und der verwendeten Software identischen Fahrzeugen, ausgegangen. Diese können, wie im Falle der Demo 2000 explizit beschrieben, zwar LKW, Personenkraftwagen (PKW) und andere Verkehrsteilnehmer

abbilden, welche jedoch die gleichen Hard- und Softwareeigenschaften aufweisen müssen. Kooperative Funktionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Hersteller und Softwarereleases werden ebenso wenig thematisiert wie unterschiedlich ausgestattete Fahrzeuge und unter welchen Umständen diese Fahrzeuge trotzdem zu einer kooperativen Funktion beitragen können.

Alle fünf Vorschläge umfassen den Aufbau einer gemeinsamen Umfeldrepräsentation. Dabei steuern die Fahrzeuge Informationen bezüglich ihres Zustands, der Umgebung und anderer Fahrzeuge zur Erschaffung eines Umfeldmodells bei. Im Vorschlag des SFB/TR 28 wird von einem identischen dezentralen Lagebild ausgegangen. Die Vorschläge des PATH-, Demo 2000- und Auto21-Projekts erzeugen das Umfeldmodell in der zentralen Steuerungseinheit. Je nach Speicherort des Umfeldmodells wird auch die Planung durchgeführt. So wird in den PATH- und Demo 2000-Architekturen von einem zentralen Berechnungsort ausgegangen, die Auto21-Architektur kann bei identischem Wissen auch eine dezentrale Planung ermöglichen. Die kooperative Funktion, also die Pfad- und Trajektorienplanung rund um Funktionen des Platoonings, sind direkt in die Architekturen eingebettet. Die Architektur des SFB/TR 28 ermöglicht eine dezentrale Planung, da auch die Daten des Umfeldmodells dezentral vorliegen. Eine verteilte Berechnung ist vorgesehen. Die kooperative Funktion ist durch die *Berechnung von Handlungsweisungen für die Einzelfahrzeuge* Teil der Architektur. Demgegenüber erlaubt Caveney's Vorschlag eine dezentrale Planung mithilfe der dezentralen Speicherung des Umfeldmodells. Die kooperativen Funktionen sollen auf die vorhandenen Module der Architektur zugreifen und diese beeinflussen können. Eine verteilte Berechnung der kooperativen Funktionen wird nicht thematisiert.

Tabelle 2.4 fasst die fünf Architekturvorschläge abschließend zusammen und listet ihre Eigenschaften auf. Die aufeinander aufbauenden PATH-, Demo2000- und Auto21-Architekturen weisen nahezu dieselben Eigenschaf-

Tabelle 2.4: Zusammenfassung der Eigenschaften der Architekturvorschläge.

Eigenschaften		Architekturvorschläge				
		PATH	Demo 2000	Auto21	SFB/TR 28	Caveney
Kommunikations-	einsatz	✓	✓	✓	✓	✓
	partner	I2V, V2V	I2V, V2V	I2V, V2V	V2V	V2X
	häufigkeit behandelt	✗	✗	✗	✗	✓
	inhalt beschrieben	(✓)	✗	✗	✓	✗
Anwendung	Umgebungen	Autobahn	Autobahn	Autobahn	alle	alle
	Verkehrseigenschaften	Effizienz, Komfort	Effizienz, Komfort	Effizienz, Komfort	Sicherheit	alle
	zeitlich	semi-kont.	semi-kont.	semi-kont.	event-getrieben	kont.
	Fahrzeuggruppen	homogen	homogen	homogen	homogen	homogen
Autonomie	fahrzeugindividuelle Alternative	(✓)	(✓)	(✓)	✗	✓
	bei kooperativer Fahrfunktion	✓	✓	✓	✗	✗
Umfeldmodellierung	gemeins. Erstellung	✓	✓	✓	✓	✓
	Speicherort	zentral	zentral	zentral	dezentral	dezentral
Planung	Berechnung	zentral	zentral	dezentral	dezentral	dezentral
	verteilte Berechnung	✗	✗	✗	✓	✗
	kooperative Funktion eingebettet	✓	✓	✓	✓	✗



ten auf. Die Architektur des Projekts SFB/TR 28 legt den Fokus auf dezentrale Sicherheit zwischen Fahrzeugen. Caveney's Architekturvorschlag ist für die Anwendung in unterschiedlichen Eigenschaften des Verkehrs sowie Umgebungen konzipiert und ist durch die nicht eingebettete kooperative Funktionalität abstrakter, weshalb einige Eigenschaften nicht klar zugeordnet werden können.

### 2.3.3 Beantwortungsgrad der Forschungsfrage und Zusammenfassung

Fünf Architekturvorschläge des Kooperativen Fahrens sind bekannt, die sich möglicherweise als Aufgabenkoordination zur Verwendung in einem fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem eignen. Zur Überprüfung der Eignung werden die Architekturvorschläge den in Abschnitt 1.1 definierten zwölf Anforderungen gegenübergestellt. Dies ermöglicht gleichzeitig eine Einschätzung zum Stand der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage. Die Gegenüberstellung ist in Tabelle 2.5 gezeigt, wobei erfüllte Anforderungen mit einem Haken versehen werden.

Tabelle 2.5: Gegenüberstellung von Anforderungen und bekannten Architekturvorschlägen.

Anforderungen	Architekturvorschläge				
	PATH	Demo 2000	Auto21	SFB/TR 28	Caveney
Einsatz von Kommunikation	✓	✓	✓	✓	✓
Kommunikationspartner (V2V und V2I)	✓	✓	✓		✓
Anwendung in allen Umgebungen				✓	✓
Anwendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz					✓
heterogene Fahrzeuggruppen					
Aufbau eines gemeinsamen Umfeldmodells	✓	✓	✓	✓	✓
Alleingestaltung der Lösung	✓	✓	✓	✓	✗
Mitgestaltung der Lösung					
Schleifen verhindern	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)
Autonomiewahrung in kooperativer Fahrfunktion	✓	✓	✓		✗
dezentrale Planung			(✓)	✓	✓
Plan enthält Trajektorien aller Teilnehmer				✓	

Die Tabelle zeigt, dass die Anforderungen des *Einsatzes von Kommunikation* und des *Aufbaus eines gemeinsamen Umfeldmodells* von allen Vorschlägen erfüllt werden. Die Kommunikation wird verwendet, um die Fahrzeuge zu koordinieren und das gemeinsame Umfeldmodell aufzubauen. Auch das *Verhindern von Schleifen* findet in allen fünf Vorschlägen Berücksichtigung. Da in keinem Vorschlag eine *Mitgestaltung* realisiert wurde und damit das Problem der Schleifen nicht auftritt, musste kein Mechanismus zur Verhinderung der Schleifen entwickelt werden. Die *Alleingestaltung* und die Kommunikation zwischen den geforderten *Kommunikationspartnern* werden von vier Vorschlägen erfüllt. Drei Methoden genügen der Anforderung an die *Autonomiewahrung in kooperativer Fahrfunktion*. Die Anforderungen *Anwendung in allen Umgebungen* und *dezentrale Planung* werden von zwei Architekturvorschlägen berücksichtigt. Dabei wird gesagt, dass die Auto21-Architektur auch dezentrale Planungen erlauben, diese jedoch nur mit Einschränkungen möglich sind. Jeweils eine Methode erfüllt die Anforderungen der *Anwendung in allen Umgebungen* und gewährleistet, dass der *Plan Trajektorien aller Teilnehmer*

enthält. Den Anforderungen an eine Anwendbarkeit bei *heterogenen Fahrzeuggruppen* und der *Mitgestaltung* beim Lösungsprozess wird keiner der Vorschläge gerecht.

Die PATH- und die Demo 2000-Architekturen schneiden beim Anforderungsvergleich identisch ab. Die Veränderungen der PATH-Architektur, die für die Demo 2000-Architektur vorgenommen wurden, haben keinen Einfluss auf die Erfüllung der in der zweiten Forschungsfrage gestellten Anforderungen. Sie erfüllen jeweils fünf bzw. sechs Anforderungen, wenn die *Verhinderung von Schleifen* als erfüllte Anforderung gezählt wird. Ihre Eigenschaften umfassen den *Einsatz von Kommunikation*, die Berücksichtigung von Fahrzeugen und Infrastruktur als *Kommunikationspartner*, den *Aufbau eines gemeinsamen Umfeldmodells*, eine *Alleingestaltung der Lösung* und eine *Autonomiewahrung in der kooperativen Fahrfunktion*. Die Erweiterung der Demo 2000-Architektur zur Auto21-Architektur hat dementsprechend eine anforderungsrelevante Veränderung erfahren. Die Möglichkeit der dezentralen Planung ist, unter Einschränkungen, hinzugekommen. Dies führt jedoch nicht zur vollen Erfüllung der Anforderung, weswegen das Ergebnis ebenfalls mit fünf bzw. sechs erfüllten Anforderungen gewertet wird. Die Architekturen des SFB/TR 28 und von Caveney erfüllen sechs bzw. sieben Anforderungen. Dabei haben sie den *Einsatz von Kommunikation*, die *Anwendbarkeit in allen geforderten Umgebungen* und die *dezentrale Berechnung* gemein. Der Vorschlag des SFB/TR 28 erfüllt die *Alleingestaltung* und den geforderten *Planumfang*. Caveneys Vorschlag ist für *Sicherheit, Komfort und Effizienzzwecke anwendbar* und berücksichtigt sowohl Fahrzeuge als auch Infrastruktur als *Kommunikationspartner*. Die Erfüllung der Aspekte der *Alleingestaltung* und der *Autonomiewahrung* sind in Caveneys Vorschlag nicht identifizierbar und deshalb entsprechend gekennzeichnet.

Es bleibt festzuhalten, dass keiner der bekannten Architekturvorschläge die Anforderungen erfüllt. Entsprechend dieser Erkenntnis bleibt die zweite Forschungsfrage nach einer Aufgabenkoordination für ein fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem relevant. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Aufgabenkoordination, die alle Anforderungen der zweiten Forschungsfrage erfüllen kann.

## 2.4 Fahrmanöverkoordination mehrerer Teilnehmer

Das Ziel dieses Abschnitts ist das Zusammentragen und Bewerten unterschiedlicher Methoden zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage nach einer Fahrmanöverkoordination für das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem. Abschnitt 2.4.1 gibt einen Überblick über Aufgaben, die mittels gemeinschaftlicher Manöver bewältigt werden. Außerdem werden die dazu eingesetzten Methoden beschrieben. Die unterschiedlichen Bereiche Luft- und Raumfahrt, Nautik, Robotik, landgebundene Fahrzeuge, Verkehrsmanagement und straßengebundene Fahrzeuge werden betrachtet. Daran schließt sich die Konkretisierung der Aspekte in Form von Erkenntnissen in Abschnitt 2.4.2 an, wobei der Fokus auf den Eigenschaften der verwendeten Methoden liegt. Abschnitt 2.4.3 beinhaltet den Abgleich zwischen den Eigenschaften der Methoden und die an sie gestellten Anforderungen sowie eine Zusammenfassung der Erkenntnisse zur dritten Forschungsfrage.

### 2.4.1 Überblick

Im Bereich der Luft- und Raumfahrt werden Teams, bestehend aus Satelliten, Raumschiffen, Luftschiffen, Helikoptern, Flugzeugen und Drohnen eingesetzt, um gemeinsam Aufgaben zu erledigen. Der Formationsflug stellt dabei die häufigste Anwendung dar [82, 92, 102, 112, 136, 137, 141, 142, 148, 153, 203, 245–247, 284, 303]. Dieser wird beispielsweise genutzt, um eine Gruppe aus Drohnen Wegpunkte in einer Formation erreichen zu lassen [132] oder eine Gruppe von Satelliten so auszurichten, dass sie als Interferometer Licht von weit entfernten Sternen wahrnehmen können [265]. Zudem ist das Täuschen von Radarstationen durch kleinere Gruppen von Drohnen, welche durch koordiniertes Flugverhalten ein größeres, sich in einer anderen Flughöhe befindliches Flugobjekt imitieren, Untersuchungsgegenstand [166, 191, 192, 200, 235]. Militärische Anwendung umfassen dazu das gemeinsame Angreifen von Zielen [17, 23, 34, 107, 135, 172, 322, 325] bei gleichzeitiger Minimierung des Risikos der Erkennung durch Radarstationen [33] oder bei Minimierung der für den Angriff notwendigen Zeit [90]. Das Erstellen der nötigen Formationen [76–78, 142] wird dabei ebenso bearbeitet wie das Auflösen der Formation [141, 142]. Außerdem wird ein gleichzeitiges Erreichen von Zielpunkten [199] und das Abfliegen von unterschiedlichen Wegpunkten durch mehrere Drohnen [6, 138] mit beschränktem Treibstoffvorrat [95] untersucht. Diese Drohnen könnten von einem Schiff losgeschickt werden und mithilfe eines aufgespannten Netzes wieder eingefangen werden [135]. Das gemeinsame Suchen [91, 224, 225, 233, 314, 322, 325, 329] und Jagen [36] auch in Gefahrensituationen [71] sind ebenso wie das Patrouillieren [252], das Erkunden eines Areals [312] und ein Verfolgen eines beweglichen Ziels [15] in zerklüfteten Stadtschluchten [40] angegangene Aufgaben. Schließlich wird die Unfallvermeidung von Flugzeugen [202, 249] auch mithilfe des Collision Avoidance System (CAS) beschrieben [5, 20].

Im nautischen Bereich bilden Schiffe und Unterseeboote Teams, die gemeinsam Aufgaben erfüllen. So beschäftigen sich viele Arbeiten mit der gemeinschaftlichen Pfadverfolgung bei gleichzeitiger Formationshaltung [26, 55, 98–100, 215, 228, 232, 266, 287, 297, 315, 316, 328]. Außerdem spielt die Erkundung und Vermessung des Meeresbodens [122, 129, 157, 226, 319] oder unbekannter Strömungen [109, 198] eine wichtige Rolle. Darüber hinaus werden die Suche und Klassifizierung unbekannter Objekte [45, 124] und das Verschieben einer Box durch mechanische Fische [326] untersucht. Ein gemeinsames Halten von Ladung [279] spielt unter Wasser ebenso eine Rolle wie das Patrouillieren und das Bewachen eines stationären Ziels [22].

Im Bereich der Robotik werden Anwendungen zusammengefasst, die von Robotern, Kleinstfahrzeugen und -flugzeugen, Manipulatoren, Zwillingshebekränen und fahrerlosen Transportfahrzeugen ausgeführt werden. Die häufigste Anwendung stellt die Formationsbewegung dar [39, 44, 75, 105, 140, 160–162, 182, 196, 217, 220, 221, 237, 267, 277, 286, 320]. Dazu wird die Erstellung der Formation [52, 53] in kleinstmöglicher Zeit [89] untersucht. Dabei kommen auch Teams von Drohnen und landgebundenen Fahrzeugen zum Einsatz [2, 239]. Weiterer Untersuchungsgegenstand ist das gemeinsame Heben bzw. Transportieren von Objekten [65, 86, 276, 281, 282, 298, 318, 321]. Das Anfahren von Zielpunkten [3, 31, 323] und das Auffinden einer beweglichen Zielregion [244] wird neben der Erkundung unbekannter Gebiete [173, 219] ebenfalls umgesetzt.

Für Roboter wird das Verteidigen einer Zone im „Capture the Flag“ untersucht [62]. Weiterhin suchen Roboterameisen den optimalen Weg von einem Start- zu einem Zielpunkt [262]. Schließlich werden ein gemeinsames Angreifen [88] und Suchen [280], die Koordination von fahrerlosen Transportfahrzeugen [50], das Sortieren von Paketen [184, 185] und eine allgemein formulierte Optimierung einer Teamkostenfunktion im allgemeinen Anwendungsfall [260] untersucht.

Der Bereich der landgebundenen Fahrzeuge umfasst Züge und autonome Fahrzeuge, die sich in unstrukturierten Gebieten bewegen. Gemeinsame Manöver werden zum Zweck der Haltung einer Formation durchgeführt [69, 96, 97, 170, 171, 222, 264, 317], die auch zur Bewachung von privaten Geländen eingesetzt wird [69]. In unbekannten und/oder potenziell gefährlichen Gebieten wird die Koordination zur gemeinschaftlichen Bewegung [37], Suche von Objekten im Allgemeinen [214] oder Minen [38] im Speziellen durchgeführt. Des Weiteren werden Zielpunkte sicher angefahren [250], die auch in Kreuzungstopologien liegen können [251]. Außerdem wird neben dem Erkunden und Kartografieren von Gebieten [83] eine Absicherung von Hochgeschwindigkeitszügen während ihrer Fahrt thematisiert [278].

Die Anwendungen des Bereichs Verkehrsmanagement beschäftigen sich mit der Steuerung von Fahrzeugen in einem Verkehrsnetz. Oftmals wird eine Koordination von Lichtsignalanlagen in Knotenpunkten vorgenommen [119, 167, 177, 188, 201, 234, 254, 301, 302, 327], die auch eine Priorisierung von Bussen [263] beinhalten kann. Speziell werden dabei beispielsweise auch eine „grüne Welle“ [106], das Überqueren einer mit einem Gewichtsmaximum ausgestatteten Brücke [126] und das Reduzieren von Start- und Stoppvorgängen an Kreuzungen untersucht [165]. Eine weitere Anwendung stellen Zuflussregelungsanlagen, also Anlagen die den Zufluss auf Autobahnen begrenzen können, dar [117, 125, 134, 181]. Die Koordination des Verkehrsflusses an Ausfahrten oder Mautstellen wird ebenso untersucht [41, 174] wie die Steuerung von Hauptverkehrsströmen [130, 150, 186, 187, 236]. Schließlich beschäftigen sich Forschergruppen mit der Bremswellenminderung [118] und dem Steuern des Verkehrs an Engstellen [285].

Die Fachrichtung der straßengebundenen Fahrzeuge fasst Anwendungen zusammen, die Interaktionen zwischen Fahrzeugen auf der Straße ermöglichen. Die häufigste Anwendung ist die Weiterentwicklung des ACC zum Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC), bei dem die Fahrzeuge mehr Informationen zur Verfügung haben und miteinander kooperieren [29, 42, 46, 101, 108, 113, 133, 144, 145, 180, 189, 193, 195, 206, 208, 212, 213, 268, 293, 331]. Auch spezielle Anwendungen für LKW [216], leichtere Transporter [261] und das Windschattenfahren von Elektrofahrzeugen [147] werden behandelt. Ähnliche Anwendungen betreffen das Fahren in einer Kolonne (Platooning). So stellt das Fahren in einer Kolonne bzw. das Aufrechterhalten eines Platoons eine entwickelte und getestete Anwendung dar [94, 111, 131, 139, 190, 204, 227, 288, 289, 313]. Weiterhin werden das Einfädeln in ein bereits bestehendes Platoon [143] und ein speziell für Lastkraftwagen entwickelter Ansatz zum Fahren im Platoon [159] untersucht. Neben dem Einsatz im CACC und dem Platooning werden Anwendungen mit dem Ziel der Steigerung der Verkehrssicherheit entwickelt. Ein Fokus liegt dabei auf der sicheren Überquerung von gefährlichen Kreuzungen [43, 84, 85, 149, 175, 176, 178]. Außerdem wird das sichere Durchfahren von Straßenverengungen untersucht [179].

Die Anwendungen der Bereiche werden mit neun unterschiedlichen Methoden zur Manöverplanung umgesetzt, die in Tabelle 2.6 dargestellt sind. Im Anschluss an die Darstellung der Methoden finden eine Zuordnung der Methoden zu den Bereichen und eine genauere Beschreibung der Verwendung der Methoden statt. Wenn eine Anwendung mit einer Kombination von Methoden umgesetzt wird, dann wird die vordergründig für die Kooperation notwendige Methode aufgeführt.

Tabelle 2.6: Neun Methoden zur Planung kooperativer Manöver.

Name der Methode	Kurzbeschreibung
Optimalsteuerungsprobleme	Maximierung bzw. Minimierung eines Ausgangssignals bzw. des Ergebnisses in Abhängigkeit einer Zielfunktion [114, 164].
Reglergesetze	Maximierung bzw. Minimierung einer Zielfunktion, in der als eine besondere Form von Optimalsteuerungsproblemen beispielsweise zwei Regler miteinander gekoppelt sind.
(virtuelle) Leader-Follower-Ansätze	Steuerung bzw. Beeinflussung des Verhaltens einer Gruppe durch beispielsweise die Nachahmung eines (virtuellen) Leaders [170].
verhaltensbasierte Ansätze	Erzeugung von Kooperation durch koordiniert oder reaktiv ausgeführte Basisverhalten [8].
hierarchische Ansätze	Lösung des Koordinationsproblems auf einer höheren (planenden Ebene) durch Trennung der ausführenden Ebene von der planenden Ebene.
gerichtete Graphen	Auflistung von Möglichkeiten zur Koordination, in der durch Suchmethoden (sub)optimale Lösungen gefunden werden.
Potenzialfeldansätze	Modellierung der Umgebung und der Entfernung zu anderen Objekten als Potenzialfunktionen mit anziehender oder abstoßender Wirkung [170].
Methode des elastischen Bands	inkrementelle Verfeinerung eines vorgegebenen Pfads bzw. einer vorgegebenen Trajektorie durch Anwendung anziehender oder abstoßender Kräfte [238].
Zustandsautomaten	Erzeugung von Verhalten auf Basis des aktuellen Zustands mithilfe von Zuständen und Transitionen [207]. Weiterhin werden unter diesem Punkt regelbasierte Ansätze zusammengefasst.

Die Anwendungen der Luft- und Raumfahrt werden mithilfe von Optimalsteuerungsproblemen [6, 20, 107, 135, 138, 166, 172, 235, 284, 322] formuliert, die einerseits lernende Anteile haben können [95] und andererseits durch die Verwendung von Spieltheorie [91] oder durch Verhandlungsabläufe [233, 252] inspiriert sind. Weiterhin sind Reglergesetze eine übliche Methode zur Erstellung von gemeinschaftlichem Verhalten [15, 23, 36, 40, 71, 76–78, 92, 136, 137, 141, 142, 191, 192, 200, 202, 203, 245–247, 249, 265, 325]. Die Leader-Follower-Methode [102, 148, 153, 303, 329] wird ebenso wie die virtuelle Leader-Follower-Methode [284, 312] angewandt. Verhaltensbasierte Ansätze werden allgemein [224, 225] oder als spezielles Modell von Reynolds [17, 132] verwendet. Hierarchische Ansätze, deren Grundidee die Trennung der Koordination und der Trajektorienberechnung bzw. Verfolgung ist, sind ebenfalls zu finden [33, 34, 90, 199, 314]. Weitere Methoden ermitteln gemeinschaftliche Trajektorien über eine sub-optimale, aber zeiteffiziente Tabu-Suche [6], mittels gerichteter Graphen mit Bewegungsprimitiven [82], durch regelbasierte Verhandlungsverfahren mithilfe eines Zustandsautomaten [5] oder mit Potenzialfeldern [112].

Für die Anwendungen der Nautik kommen unterschiedliche Koordinierungsmethoden zum Einsatz. So wird die Leader-Follower-Methode eingesetzt [55, 228, 287, 297, 316, 328]. Außerdem kommen reaktive Verfahren zur Anwendung. Dabei handelt es sich um verhaltensbasierte Ansätze [45, 157, 326], die auch mit Fuzzy-Logik umgesetzt sind [124]. Ein Ansatz mit künstlichen Anziehungs- und Abstoßungskräften [109] wird ebenfalls verwendet. Weiterhin werden Methoden verwendet, die mithilfe eines Zustandsautomaten die Koordination herstellen [122, 198, 315, 319]. Andere Forschergruppen verzichten auf den Zustandsautomaten und koordinieren die Teilnehmer direkt durch Reglergesetze [26, 98–100, 215, 226, 232, 266, 279]. Außerdem kommen eine Optimierung durch Versteigerung [129] und ein hierarchischer Ansatz [22] zum Einsatz.

Die Anwendungen der Robotik wurden mithilfe von Reglergesetzen umgesetzt [3, 31, 52, 53, 88, 105, 140, 160–162, 184, 185, 244, 267, 276, 281, 282, 286, 298, 318, 323]. Die Methode, die am zweithäufigsten zum

Einsatz kommt, ist die Leader-Follower-Methode [2, 39, 44, 65, 75, 86, 182, 196, 220, 237, 239, 277, 320, 321]. Optimalsteuerungsprobleme [62, 89], auch durch Spieltheorie inspiriert [260] oder iterativ durchgeführt [262], kommen ebenfalls zur Anwendung. Neben den Zustandsautomaten [50, 173] selbst wird die ebenfalls den Zustandsautomaten zugeordnete Methode der Petri-Netze [217] verwendet. Schließlich wird auch die Methode der Potenzialfelder genutzt [221]. Auch hierarchische [219] und verhaltensbasierte [280] Ansätze werden verfolgt.

Die Koordination landgebundener Fahrzeuge wird mittels konventionellem und virtuellem Leader-Follower-Ansatz erzielt [38, 170, 171, 264]. Außerdem kommen reaktive Methoden in Form von künstlichen Kräften in Potenzialfeldern zum Einsatz [37, 69, 170, 214]. Reglergesetze werden einerseits in Zustandsautomaten hinterlegt [83] und andererseits als Reglergesetze beschrieben, die ohne Zustandsautomaten eine direkte Kopplung der Teilnehmer vorsehen [96, 97, 250, 278, 317]. Die Optimalsteuerung wird ebenfalls angewandt [251]. Schließlich wird ein hierarchischer Ansatz gewählt [222].

Die Anwendungen des Verkehrsmanagements werden größtenteils mit Reglergesetzen umgesetzt [117, 118, 125, 134, 177, 201, 254, 301, 302], die auch auf Fuzzy-Logik basieren können [126]. Weiterhin kommen unterschiedliche Optimierungsverfahren zum Einsatz [167, 181, 186–188, 236, 285, 327]. Auch das direkte Minimieren einer Kostenfunktion ohne spezielles Optimierungsverfahren wird genutzt [119, 165, 234]. Weitere Methoden umfassen Zustandsautomaten [174], hierarchische Ansätze [130, 150, 263], die Potenzialfeld-Methode [41] und die Methode der gerichteten Graphen [106].

Regelstrategien kommen in unterschiedlichen Konzepten zur Koordination straßengebundener Fahrzeuge zur Anwendung [42, 43, 46, 108, 111, 113, 139, 143–145, 147, 180, 208, 212, 213, 216, 227, 261, 268, 288, 289, 293]. Weiterhin werden Zustandsautomaten [29, 94, 101, 133, 159, 189, 190, 193, 195, 204, 206] und die Optimalsteuerung [84, 85, 131] verwendet. Die Modellierung von Manövern in gerichteten Graphen und deren zeitoptimierte Auswahl [84, 85, 175, 176, 178, 179, 331] findet sich ebenso wie die reaktive Methode des elastischen Bands [84, 85] wieder. Weiterhin kommt die Leader-Follower-Methode zum Einsatz [313].

Tabelle 2.7 zeigt eine Übersicht der Methoden und Anwendungen aller Bereiche, während sich die Übersichten der einzelnen Bereiche Luft- und Raumfahrt (Tabelle A.1), Nautik (Tabelle A.2), Robotik (Tabelle A.3), landgebundene Fahrzeuge (Tabelle A.4), Verkehrsmanagement (Tabelle A.5) und straßengebundene Fahrzeuge (Tabelle A.6) im Anhang in Abschnitt A.2 befinden. Es zeigt sich, dass das Bewegen in einer Formation eine sehr häufig umgesetzte Anwendung darstellt. Außerdem werden Aufgaben des Suchens, Jagens, Angreifens, Verteidigens, Patrouillierens und Täuschens, die auch häufig militärischen Hintergrund haben, von vielen Forschergruppen untersucht. Mit der Koordination von Verkehrsströmen und dem CACC befinden sich fahrzeugnahe Anwendungen auf den Plätzen drei und vier. Nicht militärische Aufgaben, die als Heben-Transportieren-Sortieren-Halten zusammengefasst werden, sind die fünfthäufigste Anwendung. Es schließen sich die Gebietserkundung, die Unfallvermeidung und das Erreichen von Zielpunkten an. Weniger häufig werden Anwendungen zur Klassifikation von Objekten, zum Erstellen und Auflösen von Formationen und allgemeine Optimierungsaufgaben bearbeitet.

Hinsichtlich der Methoden zeigt sich, dass Optimalsteuerungsprobleme, Reglergesetze und Leader-Follower am häufigsten verwendet werden. Auch Zustandsautomaten werden noch relativ häufig gewählt. Die anderen Methoden kommen dagegen eher vereinzelt zur Anwendung. Die Methode des elastischen Bands wird sogar ausschließlich zur Unfallvermeidung eingesetzt. Bei Betrachtung der Methoden und den damit umgesetzten Anwendungen fällt auf, dass Reglergesetze fast für alle Anwendungen zum Einsatz kommen. Auch Optimalsteuerungsprobleme werden für eine große Anzahl von Anwendungen formuliert. Dementgegen wird die Leader-Follower-Methode vorrangig zum Bewegen in einer Formation eingesetzt. In einem deutlich kleineren Umfang kommen auch Zustandsautomaten und die Potenzialfeld-Methode für Formationsaufgaben zum Einsatz.

Abbildung 2.6 zeigt eine Aufteilung der gefundenen Veröffentlichungen in die sechs definierten Bereiche, die

Tabelle 2.7: Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen.

	Koordinationsmethoden								
	Optimalsteuerungsproblem	Reglergesetze	(virtuelles) Leader-Follower	Verhaltensbasiert	hierarchischer Ansatz	gerichtete Graphen	Potenzialfeld	elastisches Band	Zustandsautomat
Bewegen in einer Formation	[89, 131, 284]	[3, 26, 53, 92, 96–100, 105, 111, 137, 139, 140, 142, 143, 162, 202, 203, 215, 227, 232, 244, 246, 265–267, 286, 289, 317]	[2, 39, 44, 55, 75, 102, 148, 153, 170, 171, 182, 196, 220, 228, 237, 239, 264, 277, 284, 287, 297, 303, 313, 316, 320, 328]	[132]	[222]	[82]	[37, 69, 112, 170, 221]		[50, 159, 190, 204, 217, 315]
Suchen/Jagen/ Angreifen/ Verteidigen/ Patrouillieren/ Täuschen	[62, 91, 107, 135, 166, 172, 233, 235, 252, 322]	[15, 23, 36, 40, 71, 88, 192, 200, 325]	[38, 329]	[17, 225, 280]	[22, 33, 34, 90, 314]		[214]		
Koordination von Verkehrsströmen	[119, 165, 167, 181, 186, 188, 234, 236, 285, 327]	[117, 118, 125, 126, 134, 177, 201, 254, 301, 302]			[130, 150]	[106]	[41]		[174]
CACC		[42, 46, 108, 113, 144, 145, 147, 180, 208, 212, 213, 216, 261, 268, 293]				[331]			[29, 101, 133, 189, 193, 195, 206]
Heben/ Transportieren/ Sortieren/ Halten von Objekten		[184, 276, 279, 281, 282, 298]	[65, 86, 321]	[326]					
Gebiets- erkundung	[129]	[226]	[312]	[157]	[219]		[109]		[83, 122, 173, 198, 319]
Unfallvermeidung	[20, 84, 251]	[43, 249, 250, 278]				[84, 176, 179]		[84]	[5]
Erreichen von Zielpunkten	[6, 95, 138]	[31, 323]			[199]				
Klassifizierung unbek. Objekte				[45, 124]					
Erstellen und Auflösen von Formationen	[135]	[77, 142]							
Kostenfunktion/ Trajektorien optimieren	[260, 262]								

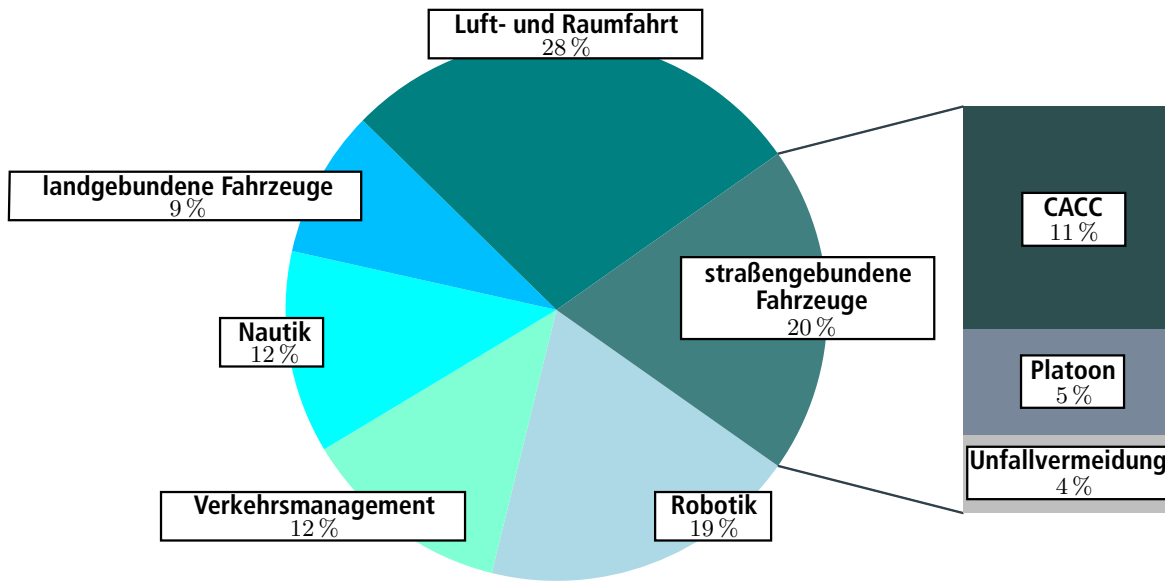


Abbildung 2.6: Prozentuale Aufteilung der 213 relevanten Literaturquellen in die sechs definierten Bereiche.

sich mit Fahrmanöverkoordination beschäftigen. Der Bereich der Luft- und Raumfahrt ist mit 28 % der größte, gefolgt von der Verkehrstechnik (20 %), der Robotik (19 %), dem Verkehrsmanagement (12 %) und der Nautik (12 %). Dem Bereich der landgebundenen Fahrzeuge werden 9 % der Publikationen zugeordnet. Weiterhin zeigt die Grafik die Aufteilung der Anwendungen innerhalb des Bereichs der straßengebundene Fahrzeuge. Daraus geht hervor, dass das CACC mit 11 % mehr als die Hälfte der Anwendungen ausmacht. Platooning und die Unfallvermeidung sind mit 5 % bzw. 4 % vertreten.

## 2.4.2 Erkenntnisse

Der Überblick zeigt, dass unterschiedlichste Anwendungen mithilfe diverser Fahrmanöverkoordinationsmethoden umgesetzt werden. Anwendungen, die sich mit der Gebietserkundung, dem Täuschen von Radarstationen, dem Suchen/Jagen sowie dem Angreifen und dem Bewegen von Objekten beschäftigen, sind weit von der Anwendung entfernt, für die die gesuchte Fahrmanöverkoordination eingesetzt werden soll. Andere Anwendungen lassen sich von der Idee her hingegen sehr gut auf den Straßenverkehr übertragen. Der Formationsflug des Bereichs Luft- und Raumfahrtstechnik bzw. die Formationsfahrt der Bereiche der landgebundenen Fahrzeuge und der Nautik sind durchaus auf ein Platoon von LKW oder einen Anfahrvorgang vor einer auf grün schaltenden Lichtsignalanlage übertragbar. Auch das Erstellen und Auflösen der Formation muss für eine Autobahnfahrt thematisiert werden, wenn beispielsweise ein Platoon von LKW andere Verkehrsteilnehmer darin behindert, die Autobahn über eine Ausfahrt zu verlassen. Ein anderes Beispiel ist die Unfallvermeidung der Luft- und Raumfahrt mithilfe des CAS, welches ebenso als Vorlage für ein Sicherheitssystem im Fahrzeug dienen könnte.

Bei genauerer Betrachtung stellt sich jedoch heraus, dass sich die Anwendungen der nicht straßengebundenen Bereiche nicht direkt auf den straßengebundenen Bereich übertragen lassen. Die hinter den Anwendungen stehenden Methoden unterliegen Randbedingungen, die für den jeweiligen Bereich gelten und einer Übertragung auf die Straße widersprechen. So bietet das Medium der Bereiche Luft- und Raumfahrt und der Nautik Bewegungsmöglichkeiten im dreidimensionalen Raum, die für Straßenfahrzeuge nicht gelten. Beispielsweise geht das CAS davon aus, dass zwei unterschiedliche Flughöhen existieren, auf denen sich die Flugzeuge kollisionsfrei begegnen können. Weiterhin müssen sich Straßenfahrzeuge sowohl an Straßentopologien als auch an die geltenden Gesetze (zum Beispiel die StVO) halten. Platooninganwendungen anderer Bereiche definieren Hin-



dernisse und verbotene Zonen, ignorieren mögliche Fahrstreifen jedoch völlig. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen der Methoden und der daraus resultierenden, nicht gegebenen Anwendbarkeit im Bereich der straßengebundenen Fahrzeuge konzentriert sich die Darstellung der Methoden zur Anwendung als Fahrmanöverkoordinationsmethode auf diejenigen, die bereits erfolgreich im Fahrzeugumfeld eingesetzt werden.

Die im Bereich der straßengebundenen Fahrzeuge genutzten Methoden umfassen die Formulierung als Optimalsteuerungsproblem, die Leader-Follower-Methode, die Methode der gerichteten Graphen, die Methode des elastischen Bands, Zustandsautomaten und formulierte Reglergesetze. Zu den Methoden wird jeweils ein Referenzsystem genannt, welches der Einschätzung nach für den Einsatz in einem fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem am besten geeignet ist. Gleichzeitig stellt es auch die Grundlage für die sich anschließende Bewertung dar. Die Methoden der Formulierung als Optimalsteuerungsproblem, der gerichteten Graphen mit Handlungsoptionen und des elastischen Bands werden durch Ansätze von Frese [84] repräsentiert. Die Leader-Follower-Methode wird durch den Ansatz von Xavier und Pan [313], die Methode der Zustandsautomaten von Lam und Katupitiya [159] und Reglergesetze durch Kato et al. [139] dargestellt. Nachstehend werden die vier Aspekte Berechnungsverfahren, Planungsmodell, Grenzen der Verfahren und Planungsgrundlage betrachtet.

Die referenzierten Systeme basieren auf unterschiedlichen Berechnungsverfahren. Die Lösung des Optimalsteuerungsproblems ist eine analytische, da alle Nebenbedingungen als lineare Gleichungen aufgefasst werden und eine Zielfunktion minimiert wird. Anders sieht dies bei den Methoden Leader-Follower und den Reglergesetzen aus. Hier werden Lösungen imitativ, das bedeutet durch Nachahmung des Verhaltens eines Vorderfahrzeugs, erzeugt. Das Planungsverfahren des Vorderfahrzeugs berücksichtigt die Randbedingungen und erlaubt es den Folgefahrzeugen so, sich auf eine relative Problemlösung zu beschränken. Außerdem ist eine kombinatorische Lösung durch die Methode der gerichteten Graphen möglich, die eine Vielzahl von Handlungsmöglichkeiten als Kombination anbietet. Eine anschließende Auswahl nach einem eigens definierten Verlustfunktional ermöglicht die Selektion der besten Kombination von Handlungsmöglichkeiten. Die Methode des Zustandsautomaten erzeugt Lösungen transitiv durch den Wechsel zwischen Zuständen, die ein gemeinsames Manöver erzeugen. Schließlich gibt es die iterative Lösungsfindung, die bei der Methode des elastischen Bands Anwendung findet. Hierbei wirken Kräfte auf eine initiale Schätzung der Trajektorien, die iterativ in einen Gleichgewichtszustand, also einen stabilen Zustand, überführt werden.

Als Planungsmodell kommt für die Leader-Follower-Methode, die Methode der Zustandsautomaten und die Methode der gerichteten Graphen das Einspurmodell zu Anwendung, während die Methode der Reglergesetze auf einer modellbasierten Regelung basiert. Die Lösung des Optimalsteuerungsproblems und die Methode des elastischen Bands legen hingegen vereinfachte Modelle zugrunde. Sie verwenden den Kammschen Reibungskreis und berücksichtigen die Fahrzeugfähigkeiten separat durch Überprüfung erlaubter Zustände und gefahrener Kurvenradien. Dies liegt an der Komplexität der letztgenannten Methoden, die durch die Abwesenheit von Entkopplungsannahmen zustande kommt. Dementgegen steht die Entkopplung der Längs- und Querrichtung bei der Leader-Follower-Methode, den Methoden des Zustandsautomaten und der Reglergesetze. Diese Entkopplungen sorgen auch für einen beschränkten Einsatz der drei Verfahren auf Längsverkehrsszenarien.

Das Optimalsteuerungsproblem ist als ein Mixed Integer Linear Programming (MILP) Problem beschrieben, welches eine Linearisierung der Zusammenhänge erfordert. Diese Linearisierung macht das Problem beherrschbar, stellt jedoch auch eine starke Vereinfachung dar. Um bei einer erhöhten Rechenleistung zu besseren Ergebnissen zu kommen, müssten die Abhängigkeiten neu formuliert werden. Die Methode des elastischen Bands kann starke Bremsmanöver nicht abbilden, da dies dazu führt, dass viele Zustände des elastischen Bands nahe beieinander oder auf einer Stelle liegen. Zudem benötigt sie eine Startschätzung der Trajektorien, um davon ausgehend ein lokales Optimum zu suchen. Ein globales Optimum kann nicht garantiert werden. Auch die Methode der gerichteten Graphen beinhaltet eine Vereinfachung, die sich als Limitierung auf sieben Handlungsoptionen äußert. Bei einer größeren zur Verfügung stehenden Rechenleistung könnte diese Grenze jedoch angehoben

werden. Im Gegensatz zu heuristischen Ansätzen löst diese Methode das vereinfachte Problem optimal.

Als Planungsgrundlage wird für die relativen Methoden (Leader-Follower und Reglergesetze) nur das Vorderfahrzeug benötigt, während die anderen vier Verfahren die Umgebung und die sich darin befindlichen Fahrzeuge und Objekte berücksichtigen. Alle Methoden eignen sich dazu, mit dem vorhandenen Wissen Trajektorien mehrerer Fahrzeuge zu planen. Bei Verwendung der relativen Methoden und des Zustandsautomaten geschieht die Planung der Trajektorie in jedem und für jedes Fahrzeug individuell. Dadurch sind effiziente und komfortable Manöver innerhalb eines Platoons planbar. Die drei Methoden der Optimalsteuerung, der gerichteten Graphen und des elastischen Bands erzeugen alle Trajektorien gleichzeitig. Dies erlaubt die Anwendung in unterschiedlichen Szenarien der Unfallvermeidung, die sich auch in verschiedenartigen Umgebungen abspielen können.

Zusammenfassend werden die sechs Verfahren steckbriefartig beschrieben:

Die Formulierung der Manöverplanung als **Optimalsteuerungsproblem** ermittelt Lösungen analytisch durch die Formulierung harter Bedingungen und die Minimierung einer Zielfunktion (Betrag der Beschleunigung). Verwendete Planungsmodelle berücksichtigten den Kammschen Reibungskreis und Fahrzeugfähigkeiten. Trajektorien werden durch Polynome vierter Ordnung dargestellt. Es gibt keine Entkopplungsannahmen, jedoch werden die Gleichungen der Randbedingungen linearisiert als MILP-Problem modelliert. Mit dieser Methode können Trajektorien für mehrere Fahrzeuge auf Basis der Umgebung und anderer Fahrzeuge bzw. Objekte geplant werden. Anwendungen umfassen die Unfallvermeidung und Unfallschwereminderung.

Die **Leader-Follower-Methode** berechnet Lösungen imitativ durch eine gesonderte Planung des Vorderfahrzeugs und eine Imitation dieses Verhaltens durch Folgefahrzeuge. Dabei werden die Steuerungsgrößen der Folgefahrzeuge anhand der Bewegung des Vorderfahrzeugs abgeleitet. Das verwendete Modell zur Planung der Trajektorien ist ein Einspurmodell, wobei die Bewegungen in Längs- und Querrichtung entkoppelt betrachtet werden. Die Planungsgrundlage sind die relative Entfernung und der Folgewinkel. Dieser Umstand sorgt für einen ausschließlichen Einsatz im Längsverkehr, wobei die Trajektorienplanung fahrzeugindividuell durchgeführt wird. Das Fahren im und das Einfädeln ins Platoon sind Anwendungen, die von der Methode umgesetzt werden.

Die Methode der **gerichteten Graphen** diskretisiert die Handlungsoptionen der Beteiligten und kombiniert diese. Eine anschließende Bewertung der Handlungsmöglichkeiten mittels eines Verlustfunktionalen ermöglicht die Auswahl der Handlungskombination mit den geringsten Kosten. Verwendete Modelle sind ein Einspurmodell, die Modellierung der Fahrzeugfähigkeiten und die Berücksichtigung des Kammschen Reibungskreises. Die erzeugten Trajektorien entsprechen Polynomen vierter Ordnung. Da keine Entkopplungsannahmen getroffen werden, wird die Komplexität über die Diskretisierung der Handlungen (sieben Handlungen pro Teilnehmer und Zeitschritt) beherrschbar. Die Methode erlaubt die Planung von Trajektorien für mehrere Teilnehmer auf Basis der Umgebung, anderer Fahrzeuge und Objekte. Gezeigte Anwendungen beschäftigen sich mit der Unfallvermeidung und der Unfallschwereminderung.

Eine iterative Lösung wird von der Methode des **elastischen Bands** errechnet. Dazu ist eine initiale Festlegung eines elastischen Bands notwendig, dessen Form sich durch die iterative Berechnung von Krafteinwirkungen verändert. Ziel der Methode ist das Erreichen einer Gleichgewichtslage aller beteiligten elastischen Bänder. Das zugrundeliegende Modell wird aus dem Kammschen Reibungskreis abgeleitet. Auch Fahrzeugfähigkeiten werden berücksichtigt. Die Trajektorien sind Polynome vierter Ordnung, die ohne Entkopplungen auf Basis der Umgebung, anderer Fahrzeuge und Objekte berechnet werden. Durch die Startschätzung besteht die Gefahr des Konvergierens hin zu lokalen Minima. Auch ist das starke Bremsen mit dann aufeinanderliegenden Punkten des elastischen Bands noch nicht gelöst. Unter diesen Randbedingungen ermöglicht die Methode die Planung von Trajektorien für alle Teilnehmer und wird in Szenarien der Unfallvermeidung und -schwereminderung gezeigt.

Die Methode des **Zustandsautomaten** erzielt die Lösung transitiv durch den Wechsel zwischen zuvor definier-

ten Zuständen. Das Planungsmodell ist ein Einspurmodell, wobei die Methode einer Entkopplung von Längs- und Querrichtung unterliegt. Einschränkungen der Methode umfassen eine nicht abbildbare Anzahl von möglichen Zuständen und nicht auflösbare Pattsituationen, die in Zustandsautomaten auftreten können. Jedes der Fahrzeuge plant Trajektorien aus einer individuellen Perspektive auf Basis der Umgebung, anderer Fahrzeuge und Objekte. Die Anwendung, die mit der Methode umgesetzt wird, ist ein Platoon, welches ein anderes Platoon auch unter sich plötzlich ändernden Umständen überholt.

Die Methode der **Reglergesetze** erzeugt Lösungen imitativ. Anhand eines vorprogrammiert fahrenden Vorderfahrzeugs berechnen Folgefahrzeuge die Eigengeschwindigkeit auf Basis von modellbasierten Annahmen. Es wird von einer Entkopplung der Längs- und Querrichtung ausgegangen. Als Planungsgrundlage werden der relative Abstand und die Differenzgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug herangezogen. Dies schränkt die Nutzung der Methode auf den Längsverkehr ein. Die Trajektorien werden individuell von jedem Fahrzeug geplant. Gezeigte Anwendungen sind das Fahren im Platoon, das Auflösen eines Platoons und das Einfädeln in ein Platoon.

### 2.4.3 Beantwortungsgrad der Forschungsfrage und Zusammenfassung

Es gibt unterschiedliche Methoden, die als Fahrmanöverkoordination in Frage kommen. Die Methoden stammen aus der Luft- und Raumfahrt, der Nautik, der Robotik, dem Bereich der landgebundenen Fahrzeuge, der Verkehrstechnik und dem Bereich der straßengebundenen Fahrzeuge. Sechs als relevant eingeschätzte Methoden werden genauer analysiert und die Eigenschaften steckbriefartig aufgeführt. Weiterhin werden diese Methoden den in Abschnitt 1.1 definierten Anforderungen gegenübergestellt. Dadurch wird eine Einschätzung zum Stand der Beantwortung der dritten Forschungsfrage möglich. Die Gegenüberstellung ist in Tabelle 2.8 gezeigt, wobei erfüllte Anforderungen mit einem Haken versehen werden.

Tabelle 2.8: Gegenüberstellung von Anforderungen und Fahrmanöverkoordinationsmethoden.

Anforderungen	Methoden					
	Optimalsteuerungsproblem	Leader-Follower	gerichtete Graphen	elastisches Band	Zustandsautomat	Reglergesetze
Planung mehrerer Fahrzeuge	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Trajektorien für alle Teilnehmer	✓		✓	✓		
Berücksichtigung nicht beeinflussbarer Teilnehmer	✓		✓	✓		
keine Entkopplung	✓		✓	✓		
Anwendbarkeit bei straßengebundenen Fahrzeugen	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anwendung in allen Umgebungen	✓	(✓)	✓	✓	(✓)	(✓)
Anwendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz						
Anwendung zur Unfallvermeidung	✓		✓	✓		
Berücksichtigung sicherer Trajektorien	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Berücksichtigung sicherer Endzustände						
Planungsgrundlage sind Fahrzeuge & Umgebung	✓		✓	✓	✓	
Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen & Fahrzeugfähigkeiten	(✓)		(✓)	(✓)		

Die Anforderungen der *Anwendbarkeit für straßengebundene Fahrzeuge* und die *Planung mehrerer Fahrzeuge* unter der *Berücksichtigung sicherer Trajektorien* sind von allen Methoden erfüllt. Da die sechs Methoden aus dem Bereich der straßengebundenen Fahrzeuge stammen, werden die Anforderungen der Anwendbarkeit in diesem Bereich und die sichere Durchführung der Manöver bereichsspezifisch erfüllt. Weiterhin handelt es sich um gemeinschaftliche/kooperative Planer, die als Grundidee die Planung mehrerer Fahrzeuge verfolgen. Dabei ist vorstellbar, dass alle Methoden in den unterschiedlichen Umgebungen funktionieren. Die Anwendbarkeit in allen Umgebungen wird mittels der Hälfte der Methoden untersucht und daher als erfüllt gekennzeichnet. Die anderen Methoden haben die Anwendbarkeit nicht explizit gezeigt, sie wird durch die Konzepte jedoch nicht ausgeschlossen und dementsprechend mit einem Haken in Klammern bewertet.

Vier der Methoden erfüllen die Anforderung bezüglich der *Planungsgrundlage* und nutzen andere Fahrzeuge und die Umgebung. Die anderen beiden Methoden planen relativ zu einem Vorderfahrzeug und erfüllen diese Anforderung daher nicht.

Drei Methoden erfüllen die Anforderungen der Berechnung von *Trajektorien für alle Teilnehmer*, die *Berücksichtigung nicht beeinflussbarer Teilnehmer*, die Verwendung keiner Entkopplungen und werden in einer *Anwendung zur Unfallvermeidung* gezeigt. Der Aspekt der *Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen und Fahrzeugfähigkeiten* ist durch die Bewertung unterschiedlicher Lösungen mittels Kostenfunktionen und fahrzeugmodellbasierter Berechnung teilweise abgedeckt. Eine unterschiedliche Parametrierung der Kostenfunktionen zur Berücksichtigung unterschiedlicher Interessen ist beispielsweise nicht vorgesehen.

Schließlich existieren zwei Anforderungen, die von keiner der Methode erfüllt werden. Dabei handelt es sich um die *Anwendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz* sowie die *Berücksichtigung sicherer Endzustände*. Neben diesen zwei nicht erfüllten Anforderungen wird auch die *Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen und Fahrzeugfähigkeiten* nur teilweise erfüllt.

Betrachtet man das Abschneiden der einzelnen Methoden, so zeigt sich, dass die Formulierung als Optimalsteuerungsproblem, die Methode der gerichteten Graphen und die Methode des elastischen Bands neuneinhalb Anforderungen erfüllen. Der Zustandsautomat erfüllt viereinhalb Anforderungen, während die Leader-Follower-Methode und die Methode der Reglergesetze jeweils dreieinhalb Anforderungen erfüllen.

Dieses Ergebnis führt zur Feststellung, dass keine Methode die Anforderungen der dritten Forschungsfrage nach einer Methode zur Fahrmanöverkoordination erfüllt. Ferner bedeutet dies, dass die dritte Forschungsfrage relevant ist. Kapitel 5 stellt eine neue Fahrmanöverkoordinationsmethode vor, die alle an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

## 2.5 Zusammenfassung des Kapitels

Das Kapitel zeigt den Stand der Wissenschaft und Technik zu den drei Forschungsfragen auf und stellt die Relevanz der jeweiligen Forschungsfragen fest. Eine systematische Literaturstudie liefert die um weitere Quellen erweiterte Grundlage zur Darstellung des Stands der Wissenschaft und Technik. Dabei wird für jede der drei Forschungsfragen ein Überblick über die relevante Literatur erstellt, der anschließend in Erkenntnissen zusammengefasst wird.

Für die erste Forschungsfrage nach einer Definition des kooperativen Verhaltens wird gezeigt, dass sich acht Quasidefinitionen aus den vier Bereichen allgemeinsprachliche Verwendung, nicht technische Verwendung, technische Verwendung und straßenverkehrliche Verwendung ableiten lassen. Der Vergleich der Quasidefinitionen mit den Anforderungen stellt heraus, dass drei Quasidefinitionen keine Anforderungen, vier Quasidefinitionen eine Anforderung und eine Quasidefinition zwei der fünf Anforderungen erfüllen. Daraus wird weiterer Forschungsbedarf abgeleitet, der in Kapitel 3 mit der Herleitung einer Definition für kooperatives Verhalten adressiert wird.

Bezüglich der zweiten Forschungsfrage hinsichtlich einer Aufgabenkoordination für das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem werden im Stand der Wissenschaft und Technik fünf Architekturvorschläge des Kooperativen Fahrens beleuchtet. Drei der Architekturen lassen beim Vergleich mit den Anforderungen fünf Anforderungen offen, die anderen beiden Methoden erfüllen jeweils eine weitere. Daraus ergibt sich, dass weiterer Forschungsbedarf bezüglich einer Aufgabenkoordination besteht. Kapitel 4 beschäftigt sich dementsprechend mit der Herleitung einer Aufgabenkoordination für das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem.

Hinsichtlich der dritten Forschungsfrage nach einer Fahrmanöverkoordination für das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem werden neun Methoden aus den Bereichen Luft- und Raumfahrt, straßengebundene Fahrzeuge, Robotik, Verkehrsmanagement, Nautik und landgebundene Fahrzeuge als Stand der Wissenschaft und Technik identifiziert. Aus diesen neun Methoden werden sechs relevante extrahiert und den Anforderungen gegenübergestellt. Zwei Methoden erfüllen dreieinhalb, eine Methode viereinhalb und die übrigen drei Methoden neuneinhalb der zwölf Anforderungen. Da die Fahrmanöverplanungsmethode des fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems alle Anforderungen erfüllen soll, wird in Kapitel 5 eine solche Methode entwickelt.

Neben der theoretischen Herleitung der Definition und der Entwicklung der Methoden soll die Anwendbarkeit in Kapitel 6 gezeigt werden. Dazu wird die Erfüllung der Anforderungen simulativ in ausgewählten Szenarien nachgewiesen.



# 3 Kooperatives Verhalten

Im Stand der Wissenschaft und Technik wird auf die unterschiedlichen Definitionen des Begriffs des kooperativen Verhaltens eingegangen. Dabei fällt auf, dass die Quasidefinitionen den gestellten Anforderungen nicht vollständig genügen. In diesem Kapitel wird daher eine neue Definition für kooperatives Verhalten erarbeitet, die die an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

Der Begriff des kooperativen Verhaltens bildet die Grundlage für die Entscheidung, ob eine Verhaltensweise kooperativ ist oder nicht. Um zu einer Definition von kooperativem Verhalten zu kommen, ist zunächst die Nennung der wesentlichen Eigenschaften von kooperativem Verhalten notwendig. Diese erlauben eine vorläufige Definition von kooperativem Verhalten, welche Aspekte aus bekannten Definitionen aufgreift, spezifische Eigenschaften auslöst und neue Aspekte hinzufügt. Der Gedanke der in Abschnitt 3.1 aufgestellten Definition ist, dass sie sich auf die in dieser Arbeit beschriebene Probleme anwenden lässt. Neben der Unterscheidung von kooperativem und nicht kooperativem Verhalten spielt Reziprozität eine wichtige Rolle. Reziprozität beschreibt, dass Teilnehmer situationsabhängig und unter Berücksichtigung vergangener kooperativer Handlungen sowohl als Geber als auch als Empfänger auftreten können. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 3.2 gesondert betrachtet. Nachdem die endgültige Definition aufgestellt und in Abschnitt 3.3 detailliert beschrieben ist, findet die Bewertung der Definition durch Vergleich mit ausgewählten bekannten Definitionen statt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 3.4, die die Beantwortung der ersten Forschungsfrage reflektiert.

Dieses Kapitel hat zum Ziel,

1. die Eigenschaften von kooperativem Verhalten herzuleiten,
2. eine Definition für kooperatives Verhalten zu geben,
3. das Konzept der Fairness zu beschreiben,
4. die Definition von kooperativem Verhalten einzuordnen und zu bewerten, sowie
5. die Beantwortung der ersten Forschungsfrage zu reflektieren.

Die vorläufige Definition und erste Erkenntnisse, die auch in diesem Kapitel behandelt werden, wurden bereits auszugsweise vom Autor veröffentlicht [59, 230, 304].

## 3.1 Begriffsbildung

Dieser Abschnitt leitet die Definition von kooperativem Verhalten anhand von grundlegenden Eigenschaften kooperativen Verhaltens her. Die Eigenschaften bilden die Grundlage für sechs Thesen zum kooperativen Verhalten, aus denen notwendige und hinreichende Bedingungen formuliert werden können. Anschließend wird sowohl eine schriftliche als auch eine grafische Definition für kooperatives Verhalten herausgearbeitet. Ferner wird zwischen den drei Verhaltensweisen des altruistisch-kooperativen, egoistisch-kooperativen und rational-kooperativen Verhaltens unterschieden.

Die nachstehenden Beschreibungen verwenden mit dem Begriff des Agenten bewusst eine abstrakte Formulierung der möglicherweise interagierenden Partner. Im Falle von kooperativem Verhalten in einem Verkehrssystem kann der Begriff des Agenten bei Bedarf direkt durch beliebige Verkehrsteilnehmer ersetzt werden.

### 3.1.1 Eigenschaften kooperativen Verhaltens

Um der Unterscheidung von kooperativem und nicht kooperativem Verhalten näher zu kommen, werden im Folgenden sechs Thesen bezüglich kooperativen Verhaltens aufgestellt. Diese Thesen stehen für sich und erlauben durch Verknüpfungen untereinander eine Definition.

1. Kooperativ beschreibt die Verhaltensweise eines Agenten:  
Lediglich eine Verhaltensweise eines Agenten kann kooperativ oder unkooperativ sein. Es ist keine Grundeigenschaft eines Agenten wie zum Beispiel seine Größe oder sein Gewicht. Ein Agent ist demnach nicht entweder kooperativ oder unkooperativ, sondern er verhält sich in einer Situation entweder kooperativ oder unkooperativ. Die Kurzform *kooperativer Verkehrsteilnehmer* bezieht sich entsprechend auf das Verhalten des Verkehrsteilnehmers in einer betrachteten Situation.
2. Kooperatives Verhalten erfordert mindestens einen anderen Agenten:  
Kooperativ ist eine Verhaltensweise gegenüber einem anderen Agenten. Demnach kann sich beispielsweise ein Verkehrsteilnehmer kooperativ gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern verhalten.
3. Kooperatives Verhalten benötigt ein Konzept von Nutzen:  
Die Benutzung des Wortes *kooperativ* oder *kooperatives Verhalten* impliziert einen positiven bzw. guten Sachverhalt. Es scheint sich um ein besseres Verhalten als *unkooperatives Verhalten* zu handeln. Damit eine Beurteilung des Verhaltens stattfinden kann, muss eine Metrik für die Bewertung von Verhaltensweisen vorliegen. Mit anderen Worten müssen die teilnehmenden Agenten Kosten oder Nutzen definieren, die eine Aussage ermöglichen, ob eine Verhaltensweise gut, also kooperativ, oder schlecht, also unkooperativ, ist. Diese Definition kann über Kosten- oder Nutzenfunktionen vorgenommen werden. Im Nachfolgenden wird zur Übersichtlichkeit von Nutzenfunktionen gesprochen, was Kostenfunktionen jedoch nicht ausschließen soll.
4. Kooperatives Verhalten kann den Eigen- und Fremdnutzen (Gesamtnutzen) beeinflussen:  
Verhalten, welches keine Nutzenfunktion beeinflusst, kann kein kooperatives Verhalten sein. Weiterhin wird ein Verhalten, welches nur die individuelle Nutzenfunktion beeinflusst, egoistisches (positive Beeinflussung) oder selbstschädigendes (negative Beeinflussung) Verhalten genannt. Verhalten, die ausschließlich die Nutzenfunktion des Gegenübers beeinflussen, können lediglich altruistisch (positive Beeinflussung) oder defektiv (negative Beeinflussung) genannt werden. Um jedoch von kooperativem Verhalten sprechen zu können, muss der Nutzen aller Agenten beeinflusst werden können. Erst durch die Möglichkeit, den Gesamtnutzen zu steigern, kann kooperatives Verhalten als solches bezeichnet werden. Das bedeutet nicht, dass zwangsläufig beide Teilnehmer Nutzen verlieren oder gewinnen. Es müssen jedoch Verhaltensweisen möglich sein, die den Nutzen beider Agenten verändern.



5. Kooperatives Verhalten erfordert willentliches und wissentliches Handeln:  
Ein Verhalten, welches den Gesamtnutzen zufällig positiv beeinflusst, wird nicht als kooperatives Verhalten bezeichnet. Um von kooperativem Verhalten zu sprechen, muss die Verhaltensweise willentlich, also vorsätzlich, erfolgen. Weiterhin müssen die Nutzenfunktionen der Beteiligten bekannt sein, um die Gesamtnutzensteigerung wissentlich herbeizuführen.
6. Kooperatives Verhalten ist relativ:  
Kooperatives Verhalten impliziert, dass es sich um eine gute Verhaltensweise handelt. Wenn es keine global optimale Verhaltensweise gibt, wird ein Referenzverhalten benötigt, um kooperative von unkooperativen Verhaltensweisen zu unterscheiden.

Die sechs aufgestellten Thesen erlauben eine Einteilung in notwendige und hinreichende Bedingungen. Notwendige Bedingungen müssen als Grundbedingungen vorherrschen, damit kooperatives Verhalten überhaupt entstehen kann. Diese werden der Situation zugeordnet. Weiterhin müssen beim Vorliegen der notwendigen auch hinreichende Bedingungen eingehalten werden, die dem Verhalten angehören.

### Notwendige Bedingungen (Situation)

Die Thesen 2, 3 und 4 bilden gemeinsam die Basis für die Überlegungen zur notwendigen Bedingungen. Demnach muss die Situation durch mehr als einen Agenten beschrieben sein. Diese Agenten müssen in der Lage sein, auszudrücken, welche Verhaltensweisen ihnen nutzen oder schaden. Weiterhin muss eine Wechselwirkung der Agenten räumlich möglich sein. Auf Basis der drei Thesen werden unterschiedliche Situationstypen entwickelt. Es gibt die entkoppelte, die abhängige und die gekoppelte Situation:

- Eine *entkoppelte Situation* bezeichnet eine Situation, in der beide Agenten keinen Einfluss auf die Kosten/Nutzen des jeweils anderen Agenten haben. Ein Beispiel für eine entkoppelte Situation ist eine Situation, in der zwei Verkehrsteilnehmer derart getrennt sind, dass sie keine Interaktionsmöglichkeiten haben. Dies ist zum Beispiel bei einer sehr großen räumlichen Entfernung der Fall.
- Eine *abhängige Situation* liegt vor, wenn ein Verkehrsteilnehmer durch sein Handeln nicht seine Kosten/Nutzen, wohl aber die Kosten/Nutzen des Anderen verändern kann. Als Beispiel diene ein Fall, in dem ein Agent dem umliegenden Verkehr eine Information zukommen lässt, dass die vor ihm befindliche Lichtsignalanlage rot zeigt und die konkurrierenden, nicht bevorrechtigten Verkehrsströme fahren können.
- Eine *gekoppelte Situation* ist dadurch charakterisiert, dass mindestens einer der Agenten durch sein Handeln gleichzeitig sowohl Einfluss auf seine Kosten/Nutzen als auch auf die Kosten/Nutzen des anderen Agenten hat. Ein Beispiel stellt das Ermöglichen des Einfädelns auf die Autobahn dar. In diesem Fall wechselt das sich bereits auf der Autobahn befindliche Fahrzeug den Fahrstreifen oder verändert seine Geschwindigkeit, um das auffädelnde Fahrzeug zu unterstützen. Es handelt sich dann um eine gekoppelte Situation, wenn beide Agenten das Abweichen vom aktuellen Fahrzustand (Beschleunigungen, Fahrstreifenwechsel), Fahrzeitenveränderungen oder Vergleichbares in ihrer Nutzenfunktion berücksichtigen.

Der Unterschied zwischen der abhängigen und der gekoppelten Situation ist demnach die Berücksichtigung der möglichen Verhaltensweisen in beiden Nutzen- oder Kostenfunktionen. Eine gekoppelte Situation kann dabei, wie auch eine abhängige Situation, einseitig und somit unsymmetrisch sein. Die Thesen 2, 3 und 4 sind ausschließlich durch die gekoppelte Situation erfüllt.

### Hinreichende Bedingungen (Verhalten)

Die Beschreibung des Verhaltens, welches als kooperatives Verhalten definiert werden soll, wird durch die Thesen 1, 5 und 6 gegeben. Die erste These besagt, dass kooperatives Verhalten eine Verhaltensweise und keine Grundeigenschaft eines Agenten ist. Weiterhin beschreibt These 5 die Notwendigkeit, dass diese Verhaltensweise willentlich und wissentlich erfolgt. Schließlich wird kooperatives Verhalten als relatives Verhalten aufgefasst: Es ist besser als ein anderes, ebenfalls mögliches Verhalten.

### 3.1.2 Vorläufige Definition und Differenzierung kooperativer Verhaltensweisen

Die notwendigen und hinreichenden Bedingungen ermöglichen eine vorläufige Definition kooperativen Verhaltens, wie sie in [59] bereits gegeben wurde:

**Definition (vorläufig)** Ein Verhalten eines Agenten  $A_1$  wird als ein *kooperatives Verhalten* bezeichnet, wenn es sich in einer gekoppelten Situation um ein *willentliches und wissentliches Verhalten* gegenüber mindestens einem anderen Agenten  $A_2$  handelt, welches eine *Steigerung des Gesamtnutzens*  $N_G(n_1, n_2)$  oder eine Verringerung der Gesamtkosten  $K_G(k_1, k_2)$  im Vergleich zu einer *Referenzsituation* hervorruft.

Weiterhin ist es möglich, diese Definition in ein Kosten- oder Nutzendiagramm zu überführen. Im Folgenden werden die Überlegungen anhand eines Nutzendiagramms durchgeführt, welches in Abbildung 3.1 gezeigt ist. Es besteht aus zwei Achsen, die den Nutzen für Agent  $A_1$  (Eigennutzen,  $n_1$ ) und für Agent  $A_2$  (Fremdnutzen,  $n_2$ ) wiedergeben. Ausgehend von einem Referenznutzen infolge eines Referenzverhaltens können vier unterschiedliche Verhaltensweisen von Agent 1 durchgeführt werden. Ein Verhalten, welches primär den Nutzen des anderen Agenten vergrößert, wird als altruistisches Verhalten bezeichnet. Als egoistisches Verhalten kann ein Verhalten beschrieben werden, das primär die Steigerung des eigenen Nutzens forciert. Ein defektives Verhalten schadet dem Nutzen des Gegenübers, während ein selbstschädigendes Verhalten das Ziel hat, den eigenen Nutzen zu verkleinern.

Im Nutzendiagramm kann nun der Gesamtnutzen  $N_G(n_1, n_2)$  für die beiden Agenten  $A_1$  und  $A_2$  im einfachsten Fall durch Addition der Einzelnutzen bestimmt werden. In diesem Fall wird von einer direkten Substituierbarkeit der Nutzen ausgegangen: Eine Einheit Nutzen von Agent 1 hat denselben Wert wie eine Einheit Nutzen von Agent 2. Weiterhin ist es denkbar, dass die Nutzen beider Agenten unterschiedlich gewichtet sind: Eine Einheit Nutzen von Agent 1 hat beispielsweise den doppelten Wert einer Einheit des Nutzens von Agent 2. Schließ-

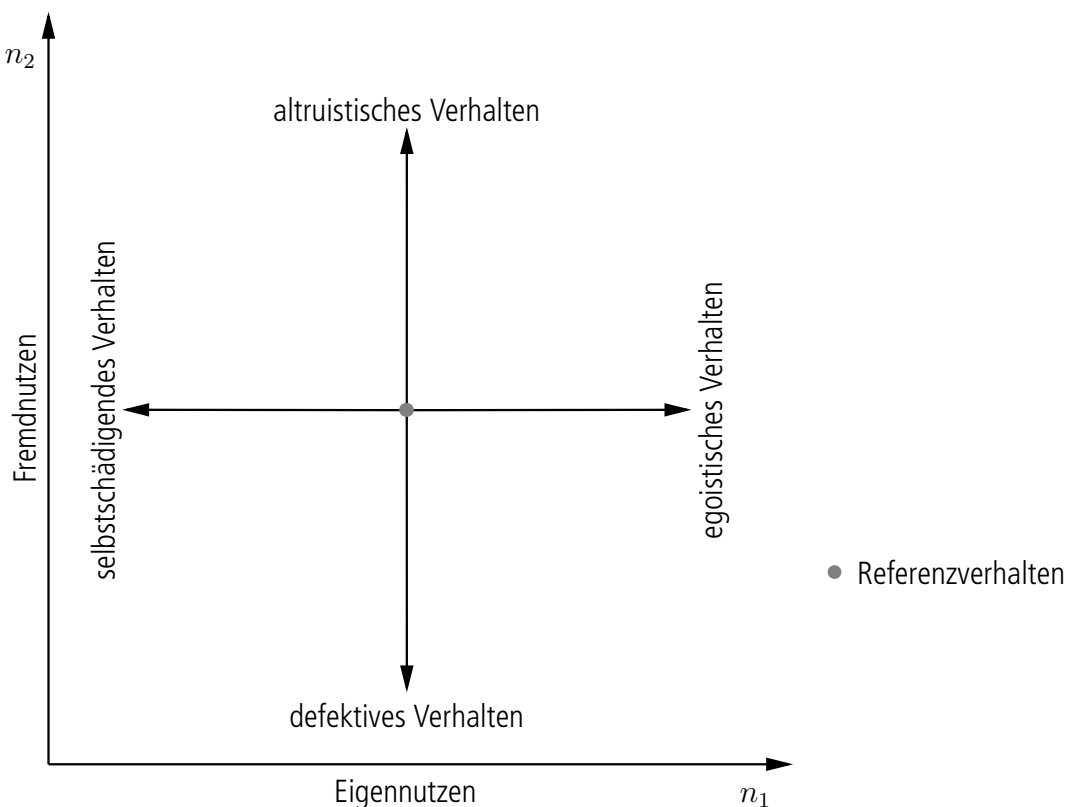


Abbildung 3.1: Einfluss der Verhaltensweisen von Agent  $A_1$  auf die Nutzen  $n_1$  und  $n_2$ .

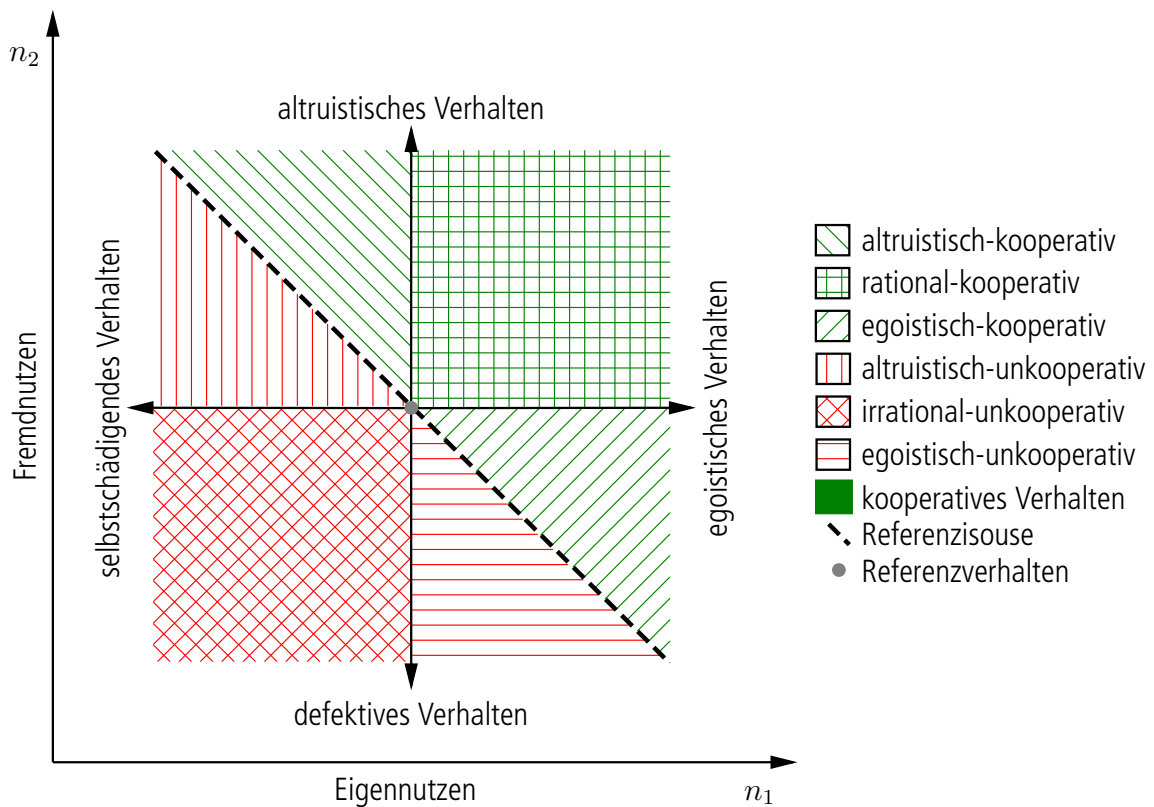








Abbildung 3.2: Durch den Gesamtnutzen  $N_G(n_1, n_2)$  illustriertes kooperatives Verhalten in Anlehnung an [59].

lich besteht die Möglichkeit, dass der Nutzen nicht substituierbar ist: Eine Einheit Nutzen von Agent 1 ist mehr wert als jede Einheit Nutzen von Agent 2. In den folgenden Betrachtungen wird aus Gründen der Anschaulichkeit von einer direkten Substituierbarkeit von Nutzen ausgegangen. Mit dieser Annahme lassen sich Linien konstanten Gesamtnutzens (Isouse) als Geraden in das Nutzendiagramm in Abbildung 3.2 eintragen. Im Bereich oberhalb der Isouse steigt der Gesamtnutzen, unter ihr fällt er. Wenn eine Isouse durch den Referenzpunkt verläuft, wird sie Referenzisouse genannt. Mit der vorstehenden Definition kann somit von kooperativem Verhalten gesprochen werden, wenn durch eine Verhaltensweise eines der Agenten ein Gesamtnutzen oberhalb der Referenzisouse erzielt wird. Garapin et al. [93] nutzen zur Ergebnisdarstellung unterschiedlicher Verhalten einer Probandenstudie einen ähnlichen Ansatz. Bei ihnen gibt es zwischen den auch hier vorgestellten Achsen altruistisches und egoistisches Verhalten jedoch einen expliziten Bereich, der kooperatives Verhalten bezeichnet. Das defektive Verhalten wird als aggressiv bezeichnet, während das selbstschädigende Verhalten in der Studie nicht beobachtet wurde.

Ferner wird das kooperative Verhalten in die drei Bereiche altruistisch-kooperatives Verhalten, egoistisch-kooperatives Verhalten und rational-kooperatives Verhalten unterschieden, wobei allen drei Bereichen gemein ist, dass der Gesamtnutzen gesteigert wird. An einem Beispiel mit zwei Agenten bedeutet dies:

-  Altruistisch-kooperatives Verhalten liegt dann vor, wenn ein Agent durch sein Verhalten den Nutzen seines Gegenübers stärker steigert, als er seinen eigenen Nutzen verringert.
-  Eine rational-kooperative Verhaltensweise steigert sowohl den Eigen- als auch den Fremdnutzen und kann daher auch als Win-Win-Situation bezeichnet werden.
-  Als egoistisch-kooperatives Verhalten wird eine Verhaltensweise bezeichnet, bei der der eigene Zuwachs an Nutzen die Verringerung des Nutzens des Gegenübers übersteigt.

Die unkooperativen Bereiche haben gemeinsam, dass der Gesamtnutzen verringert wird. Entsprechend zu ihren kooperativen Pendanten werden diese als altruistisch-unkooperatives Verhalten, egoistisch-unkooperatives Verhalten und irrational-unkooperatives Verhalten bezeichnet:

-  Als altruistisch-unkooperativ wird ein kleinerer Gewinn des Anderen bei höherem Verlusten des eigenen Nutzens bezeichnet.
-  Irrational-unkooperatives Verhalten liegt dann vor, wenn beide Teilnehmer an Nutzen verlieren.
-  Das egoistisch-unkooperative Verhalten ist eine Verhaltensweise, bei der der Gewinn an eigenem Nutzen den Verlust an Nutzen des Anderen nicht übersteigt.

Die präsentierte Definition des kooperativen Verhaltens erlaubt das Ableiten von drei Grundsätzen:

1. Die Einordnung, ob kooperatives Verhalten vorliegt, hängt allein vom Nutzen für die Beteiligten ab. Somit kann dieselbe Verhaltensweise in einer Situation einmal kooperativ und einmal unkooperativ sein, je nachdem, ob der Gesamtnutzen gesteigert oder verringert wird.
2. Kooperatives Verhalten kann nicht allein auf altruistisches Verhalten beschränkt werden. Es gibt gleichermaßen egoistische wie altruistische Verhaltensweisen, die der Definition von kooperativem Verhalten entsprechen. Mit anderen Worten bedeutet das, dass nicht jedes altruistische Verhalten als kooperatives Verhalten bezeichnet werden kann. Ebenso können egoistische Verhaltensweisen durchaus kooperativ sein.
3. Die Verhaltensweisen mehrerer Agenten müssen zusammenpassen. So treten egoistisch-kooperatives Verhalten und altruistisch-kooperatives Verhalten immer gemeinsam auf, während rational-kooperative Verhalten paarweise auftreten. Wenn Agent  $A_1$  sich egoistisch-kooperativ verhält, muss der andere Agent die altruistisch-kooperative Verhaltensweise einnehmen. Analog dazu muss sich ein Agent  $A_2$  egoistisch-kooperativ verhalten, wenn Agent  $A_1$  altruistisch-kooperativ ist. Als letzte Möglichkeit der passenden Verhaltensweisen können sich beide Agenten  $A_1$  und  $A_2$  rational-kooperativ verhalten.

Das kooperative Verhalten lässt sich somit vollumfänglich abbilden und ist für Maschinen und Menschen bei bekannter Nutzenfunktion bzw. dem Ergebnis der Nutzenfunktion gleichermaßen verständlich.

## 3.2 Fairness

Die vorläufige Definition von kooperativem Verhalten basiert auf dem Geben und Nehmen von Nutzen. Ein System, welches auf dem Austausch von Nutzen aufbaut, muss für die Nutzer nachvollziehbar und vor allem fair sein. Der Punkt der Fairness umfasst einerseits die Fairness in einer einzelnen Situation und andererseits die Fairness über mehrere Situationen hinweg. So beschäftigt sich die Spieltheorie mit Strategien für einmalig und mehrfach gespielte Spiele, in der auch Antworten zu Fragen über beispielsweise egoistische und kooperative Spielstrategien gegeben werden. Grundgedanken zur Spieltheorie und deren Anwendung können in der einschlägigen Literatur nachvollzogen werden (u.a. [211, 259, 295]).

### Fairness in einer Situation

In einer Situation ist Fairness eine Grundvoraussetzung bei der Berechnung von individuellen Kosten bzw. Nutzen. Somit soll das realistische Abschätzen von Kosten jederzeit möglich sein. Nicht toleriertes Verhalten beinhaltet das Beaufschlagen von Kosten, um unvorteilhafte Verhaltensweisen mit mehr Kosten oder weniger Nutzen abzuwenden. Weiterhin müssen die Kosten/Nutzen sich in einer gleichen Skala bewegen: Durch unterschiedliche Bewertungsskalen werden tendenziell die Teilnehmer bevorzugt, die für ein gleiches Manöver mehr Kosten oder weniger Nutzen berechnen. Wenn Teilnehmer A Kosten im Kostenintervall  $[0; 1]$  berechnet, Teilnehmer B

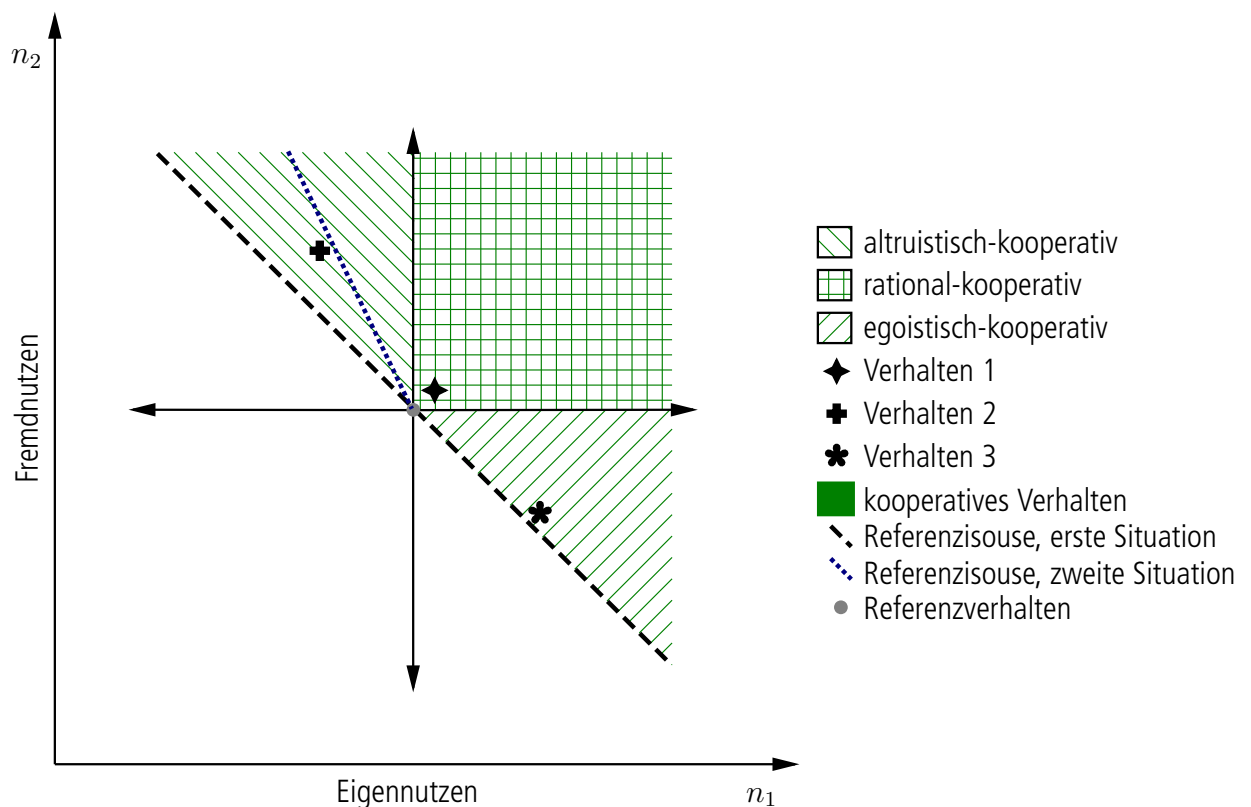


Abbildung 3.3: Darstellung des kooperativen Bonussystems in Anlehnung an [230].

jedoch Kosten im Kostenintervall  $[10; 100]$  berechnet, wird Teilnehmer B bei anfallenden Kosten automatisch bevorzugt, da seine Kosten durch keine Kostenreduktion von Teilnehmer A ausgeglichen werden können.

Fairness in einer Situation bedeutet jedoch auch, dass es durchaus zu unterschiedlichen Kosten/Nutzen für dasselbe Verhalten zweier unterschiedlicher Teilnehmer kommen kann: So entscheidet die Parametrierung einer möglichst einheitlichen Kostenfunktion über kooperative und unkooperative Verhaltensweisen. Diese einheitlichen Teile müssen durch eine Standardisierung festgelegt werden, deren Einhaltung verpflichtend ist, um am System teilnehmen zu dürfen. Wenn die Fairness in einer Situation sichergestellt ist, wird der Gesamtnutzen in jeder Situation gesteigert. Mit anderen Worten bedeutet das, dass jeder Agent im Durchschnitt von jeder kooperativ aufgelösten Situation profitiert und somit nur wenig Motivation besitzt, das System abzuschalten.

### Fairness über mehrere Situationen

Damit einzelne Agenten nicht dauerhaft auf Kosten anderer profitieren, ist auch die Wahrung der Fairness über mehrere Situationen hinweg erforderlich (Reziprozität). Diese kann durch ein Kosten/Nutzen-Gedächtnis hergestellt werden, welches vermerkt, wie oft ein Teilnehmer schon profitiert oder zurückgesteckt hat. Ein solches kooperatives Belohnungssystem bevorzugt nun definitionsgemäß zuvor altruistisch-kooperative Handelnde gegenüber zuvor egoistisch-kooperativen Teilnehmern. Durch diese als Systemfairness bezeichnete Fairness steigt auch der Anreiz, Kosten in einzelnen Situationen als Investitionen aufzufassen. Diese Investitionen sorgen für eine langfristige Steigerung des Nutzens, da durch eine hohe Bereitschaft zur Kooperation der Gesamtnutzen in vielen Situationen gesteigert wird. Beispielsweise haben Garapin et al. [93] herausgefunden, dass Individuen bereit sind, mehr Kosten auf sich zu nehmen, wenn die Chance der Rückvergütung besteht.

Das kooperative Belohnungssystem sieht vor, vorherige Verhaltensweisen in die Bewertung der Entscheidung zur nächsten kooperativen Verhaltensweise miteinzubeziehen. Abbildung 3.3 zeigt ein Beispiel des Belohnungssystems. Das Beispiel wird durch eine zweimal wiederholte Situation zwischen zwei Agenten beschrieben. Es gibt die drei Verhaltensweisen 1, 2 und 3. Bei allen Verhaltensweisen handelt es sich um kooperatives Verhalten.

Nach der Definition aus Abschnitt 3.1 würde anhand des Gesamtnutzens zweimal das Verhalten 2 gewählt. Das bedeutet, dass Teilnehmer 2 zweimal profitiert, während Teilnehmer 1 zweimal Nutzen verliert. Bei  $n$  Wiederholungen würde sich immer dasselbe Bild geben: Teilnehmer 1 würde  $n$ -mal Nutzen verlieren und Teilnehmer 2  $n$ -mal profitieren. Das kooperative Bonussystem bewirkt nun, dass sich die Bewertung kooperativen Verhaltens verändert. Dargestellt wird die sich ändernde Bewertung durch die blaue Referenzisouse in Abbildung 3.3: Verhalten 2 ist demnach im zweiten Durchlauf nicht mehr kooperativ, da es sich unterhalb der neuen Referenzisouse befindet. Also könnte sowohl Verhalten 1 als auch Verhalten 3 durchgeführt werden. Aufgrund des höheren Gesamtnutzens, der sich durch den größeren Abstand zur Referenzisouse zeigt, wird Verhalten 1 gewählt. Das vorgeschlagene Bonussystem verfolgt also das Ziel, den Nutzen aller Teilnehmer zu maximieren. Teilnehmern, die bereits profitiert haben, wird der egoistisch-kooperative Bereich eingeschränkt. Dementgegen wird der altruistisch-kooperative Bereich bei Teilnehmer begrenzt, die bereits Verluste verzeichnen mussten. Das Limit der Begrenzung stellt der rational-kooperative Bereich dar, da beide Teilnehmer in diesem Bereich profitieren. In diesem Beispiel wird es also trotzdem in jeder Situation dazu kommen, dass Teilnehmer 2 profitiert. Da Verhalten 3 einen geringeren Gesamtnutzen als Verhalten 1 bzw. 2 besitzt und Verhalten 1 im rational-kooperativen Bereich liegt, würde Verhalten 3 selbst bei  $n$  Wiederholungen nie gewählt werden.

Die vorläufige Definition muss also um den Aspekt der vorgestellten Fairness bzw. Reziprozität erweitert werden.

## 3.3 Eigenschaften und Bewertung der Definition kooperativen Verhaltens

Die erarbeitete Definition von kooperativem Verhalten ermöglicht es, kooperatives von unkooperativem Verhalten zu unterscheiden. Die Definition lautet:

**Definition** Ein Verhalten eines Agenten  $A_1$  ist dann ein kooperatives Verhalten, wenn es sich in einer *gekoppelten Situation* um ein *willentliches und wissentliches Verhalten* gegenüber mindestens einem *anderen Agenten*  $A_2$  handelt, welches eine *Steigerung des Gesamtnutzens*  $N_G(n_1, n_2)$  oder eine Verringerung der Gesamtkosten  $K_G(k_1, k_2)$  im Vergleich zu einer *Referenzsituation* unter Berücksichtigung von *Verhalten in der Vergangenheit*  $N_{G(t-\Delta t)}$  bzw.  $K_{G(t-\Delta t)}$  hervorruft.

Die Definition beschreibt die notwendige Situation mit einer Unterscheidung zwischen einer ungekoppelten, einer abhängigen und einer gekoppelten Situation. Dabei verhält sich mindestens ein Agent gegenüber einem anderen Agenten derart, dass der Gesamtnutzen gesteigert oder die Gesamtkosten reduziert werden. Ferner können drei kooperative Verhaltensweisen unterschieden werden: Ein Agent, der zwecks einer Gesamtkostenreduzierung Kosten auf sich nimmt, handelt altruistisch-kooperativ, während sich ein Agent, der von der Kostenaufnahme profitiert, egoistisch-kooperativ verhält. Wenn beide Agenten von einer Gesamtkostenreduzierung profitieren, wird dies als rational-kooperativ bezeichnet. Die Verhaltensweisen, die zu dieser Gesamtkostenreduzierung führen, müssen willentlich und wissentlich ausgeführt werden. Dabei spielt die Reziprozität, also die Berücksichtigung von Fairness im System durch das Einbeziehen von vergangenem Verhalten, eine entscheidende Rolle. Die Definition kann sowohl schriftlich formuliert, als auch grafisch in einem Nutzendiagramm illustriert werden. Tabelle 3.1 zeigt die Eigenschaften der neuen Definition auf.

Tabelle 3.1: Eigenschaften der neuen Definition kooperativen Verhaltens.

Eigenschaften	
notwendige Situation	gekoppelte Situation
Nennung der Beteiligten und deren Interaktionen	ein Agent gegenüber mindestens einem anderen Agenten
Steigerung des Gesamtnutzens / Verringerung der Gesamtkosten	✓
Unterscheidung kooperativer Verhalten	altruistisch-kooperativ, egoistisch-kooperativ, rational-kooperativ
gezieltes Verhalten	willentlich und wissentlich
Reziprozität	✓
Darstellungsmöglichkeit	schriftlich & grafisch

### Einordnung und Bewertung

Bei der Einordnung und Bewertung der neuen Definition für kooperatives Verhalten soll ein Vergleich mit bekannten Definitionen durchgeführt werden. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Eigenschaften und der Erfüllung der Anforderungen zu dokumentieren. Der Vergleich zwischen den Definitionen ist in Tabelle 3.2 gezeigt. Die Tabelle belegt, dass die neue Definition alle Anforderungen der ersten Forschungsfrage adressiert.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung von Anforderungen der Definitionen kooperativen Verhaltens.

Anforderungen	„Definition“								
	A1	N1	N2	N3	T1	T2	T3	V1	Neue Def.
notwendige Situation						✓			✓
Nennung der Beteiligten und deren Interaktionen			✓	✓					✓
Steigerung des Gesamtnutzens / Verringerung der Gesamtkosten								✓	✓
gezieltes Verhalten									✓
Reziprozität		✓						✓	✓

Keine der im Stand der Wissenschaft und Technik aufgezeigten Quasidefinitionen erfüllt mehr als zwei Anforderungen. Darüber hinaus erfüllt die neue Definition **als einzige die Anforderung des gezielten Verhaltens**. Weiterhin wird im Stand der Wissenschaft und Technik keine **Unterscheidung kooperativer Verhaltensweisen** vorgenommen, welche eine detaillierte und differenzierte Betrachtung kooperativen Verhaltens erlaubt. Auch ist die **grafische Darstellung** eine Besonderheit der neuen Definition.

## 3.4 Zusammenfassung des Kapitels

Das vorliegende Kapitel hat die Definition von kooperativem Verhalten zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage zum Ziel. Dazu werden drei Teilschritte beschrieben, die die Herleitung der Eigenschaften von kooperativem Verhalten, eine vorläufige Definition und die Beschreibung von Fairness beinhalten. Aus sechs Thesen über kooperatives Verhalten werden notwendige und hinreichende Bedingungen entwickelt. Die Bedingungen lassen das Aufstellen einer vorläufigen Definition für kooperatives Verhalten zu. Sie erlaubt die Unterscheidung von kooperativem Verhalten auf der einen und nicht kooperativem Verhalten auf der anderen Seite. Ferner können kooperative Verhalten in egoistisch-kooperative, altruistisch-kooperative und rational-kooperative Verhalten unterschieden werden. Neben diesen Erkenntnissen ist es möglich, die Definition von kooperativem Verhalten in einem Nutzendiagramm grafisch zu illustrieren. Dabei zeigt sich, dass sich kooperative Verhaltensweisen über einer als *Isouse* (Linie gleichen Nutzens) bezeichneten Linie bewegen. Schließlich wird die vorläufige Definition um den Aspekt der Fairness zur finalen Definition von kooperativem Verhalten erweitert. Fairness wird erreicht, wenn auch vergangene Verhaltensweisen Einfluss auf die Verhaltensbewertung der Zukunft haben. Das Kapitel schließt mit einer Gegenüberstellung der neuen Definition mit den aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bekannten Definitionen. Die Gegenüberstellung stellt dar, dass die neue Definition als einzige alle Anforderungen erfüllt und mit der Unterscheidung von kooperativen Verhaltensweisen sowie der Illustration im Nutzendiagramm weitere nützliche Merkmale aufweist.

### **Die Antwort auf die Forschungsfrage nach einer Definition von kooperativem Verhalten lautet:**

Ein Verhalten eines Agenten  $A_1$  ist dann ein kooperatives Verhalten, wenn es sich in einer *gekoppelten Situation* um ein *willentliches und wissentliches Verhalten* gegenüber mindestens einem *anderen Agenten*  $A_2$  handelt, welches eine *Steigerung des Gesamtnutzens*  $N_G(n_1, n_2)$  oder eine Verringerung der Gesamtkosten  $K_G(k_1, k_2)$  im Vergleich zu einer *Referenzsituation* unter Berücksichtigung von *Verhalten in der Vergangenheit*  $N_{G(t-\Delta t)}$  oder  $K_{G(t-\Delta t)}$  hervorruft.



## 4 Aufgabenkoordination mehrerer Teilnehmer

Der Stand der Wissenschaft und Technik zeigt, dass es unterschiedliche Möglichkeiten der Aufgabenkoordination gibt, die jedoch nicht alle an sie gestellten Anforderungen erfüllen. Dieses Kapitel beschäftigt sich demnach mit der Entwicklung einer neuen Aufgabenkoordination für das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem.

Die Aufgabenkoordination ist der Prozess, der von der Feststellung eines Konflikts bis zur Bewältigung der Situation durchgeführt wird. Dazu wird die kooperative Abstimmung auf Basis einer deliberativen Steuerungsarchitektur entwickelt, die in Abschnitt 4.1 erläutert wird. Abschnitt 4.2 thematisiert die für die fahrzeugübergreifende Koordination notwendigen Anpassungen, welche die deliberative Steuerungsarchitektur zu einer vernetzten Steuerungsarchitektur erweitert. Veränderungen der Module und ihrer Schnittstellen werden ebenso beschrieben wie die für die kooperative Abstimmung benötigten neue Nachrichtentypen, die den Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen sicherstellen. Dabei werden sowohl die Quellen der Nachrichten als auch ihre Aufgabe bzw. Inhalte beschrieben. Die Eigenschaften und Anwendungsbereiche der kooperativen Abstimmung werden in Abschnitt 4.3 herausgearbeitet und mittels eines Vergleichs mit dem aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bekannten Methoden bewertet. Abschließend wird das Kapitel in Abschnitt 4.4 zusammengefasst und die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage reflektiert.

Dieses Kapitel hat zum Ziel,

1. die vernetzte Steuerungsarchitektur zu entwickeln,
2. neue V2V-Nachrichten konzeptionell zu definieren,
3. die kooperative Abstimmung einzuordnen und zu bewerten, sowie
4. die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage zu reflektieren.

Die kooperative Abstimmung wurde in ihren grundlegenden Ideen bereits vom Autor veröffentlicht [80]. Darüber hinaus wurde eine erste Anwendung des dezentralen Aufgabenkoordinationsprozesses für eine ausgewählte Situation beschrieben [81].

## 4.1 Aufbau der Aufgabenkoordination

Der Prozess der Aufgabenkoordination beschreibt, wie unterschiedliche Fahrzeuge in einer Situation von der Konfliktfeststellung bis zur Konfliktlösung interagieren. In dieser Arbeit wird die gleichzeitige Nutzung der begrenzten Ressource Verkehrsfläche als Konflikt verstanden. Um einen solchen Konflikt beizulegen, wird eine Koordination der Beteiligten benötigt. Durch eine kooperative Koordination zwischen den Verkehrsteilnehmern ist es denkbar, dass bessere oder effizientere Lösungen gefunden werden können. Dabei kann die kooperative Koordination von einer zentralen, auch externen, Instanz oder aus der gesamten Gruppe heraus erfolgen. Das Ergebnis ist ein Vorschlag zur Konfliktlösung, der die Belange der Teilnehmer bestmöglich berücksichtigen sollte, da sonst die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der Vorschlag von einzelnen nicht angenommen wird und somit nicht ausgeführt werden kann. Damit eine Konfliktlösung in der Gruppe Erfolg haben kann, muss die Aufgabenkoordination den Teilnehmern neben den inhaltlichen, abzuarbeitenden Punkten auch übergeordnete Rechte wie ein Mitsprache- und Vetorecht einräumen. Um die Koordination zwischen Teilnehmern zu erreichen, orientiert sich der Prozess an einem bereits für Einzelfahrzeuge bekannten, deliberativen Kontrollparadigma, welches in Abbildung 4.1 gezeigt ist.

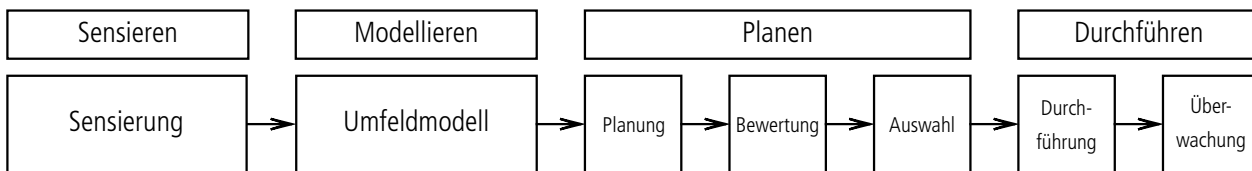


Abbildung 4.1: Deliberatives Kontrollparadigma für ein Fahrzeug.

Das deliberative Kontrollparadigma für ein Fahrzeug ist durch die Phasen Sensierung, Modellierung, Planung und Durchführung beschrieben. In der Sensierungsphase werden Sensorinformationen durch die unterschiedlichen, im Fahrzeug verbauten Sensoren aufgezeichnet. Unterschiedliche Sensoren werden gleichzeitig beispielsweise mit dem Ziel eingesetzt, die Vorteile unterschiedlicher Messprinzipien zu vereinen. Die Sensorinformationen werden in einem Umfeldmodell fusioniert, um der Herausforderung der Detektion derselben Objekte durch unterschiedliche Sensoren zu begegnen. Dieser Teil wird auch als Modellierung bezeichnet. Er fügt Sensordaten unterschiedlicher Sensoren und Zeitintervalle zu einem plausiblen Umfeldmodell zusammen. Auf dieser Basis kann eine Planungsinstanz die notwendigen Berechnungen zur Bewältigung der Konfliktsituation durchführen. Einige Verfahren erzeugen genau eine Lösung, während andere Verfahren verschiedene Möglichkeiten berechnen. Im Falle mehrerer Lösungsmöglichkeiten findet eine Bewertung statt. Anschließend wird die, nach einem definierten Kriterium, optimale Lösung ausgewählt. Die Durchführung stellt schließlich das Fahren des geplanten Manövers sicher.

Auf Basis der deliberativen Steuerungsarchitektur kann eine vernetzte Steuerungsarchitektur entwickelt werden. In der vernetzten Steuerungsarchitektur können sich die unterschiedlichen Phasen über mehrere Fahrzeuge hinweg erstrecken. So kann ein Fahrzeug einen Plan erzeugen, der von anderen Fahrzeugen nach einer positiven fahrzeugindividuellen Prüfung angenommen und durchgeführt wird. Um sinnvolle Anknüpfungspunkte für den Austausch von Informationen zwischen den Fahrzeugen zu bieten, werden die vier Phasen wie in Abbildung 4.2 angepasst. Die vier Phasen und die dazugehörigen Module werden nachstehend vorgestellt und einzeln beschrieben.

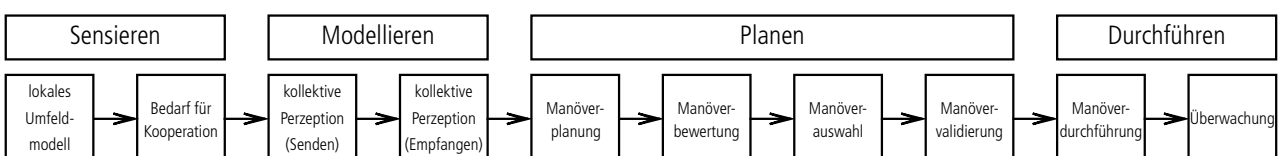


Abbildung 4.2: Deliberatives Kontrollparadigma für ein vernetztes Fahrzeug in Anlehnung an [80].

## Sensieren

Die Sensierungsphase fasst die Wahrnehmung und Verarbeitung der Situation in einem Fahrzeug zusammen. Das Ergebnis ist das lokale Umfeldmodell, welches alle fahrzeugseitig detektierten Objekte enthält. Dieses entspricht somit der Sensierungs- und Modellierungsphase aus Abbildung 4.1. Beim Prozess für vernetzte Fahrzeuge bildet es die Grundlage zur Situationsinterpretation. Die Situationsinterpretation findet im zweiten Modul statt, welches den Bedarf für Kooperation mittels eines geeigneten Algorithmus feststellt und den Prozess zur kooperativen Abstimmung startet. Die Konfliktsituation kann von einem oder mehreren Beteiligten erkannt werden. Anschließend verifizieren die Fahrzeuge, ob sie in die Konfliktsituation involviert sind. Fahrzeuge, die feststellen, dass sie nicht involviert sind, nehmen nur optional am weiteren Prozess teil.

Es handelt sich um eine eventgetriebene Konfliktlösung, die andere Fahrzeugfunktionen im Notfall überstimmt. Die an die nächste Phase übergebenen Informationen bestehen einerseits aus einer Bedarfsfeststellung für Kooperation inklusive der Konfliktsituation und andererseits aus dem lokal fusionierten Umfeldmodell.

## Modellieren

Auf Basis des lokalen Umfeldmodells eines jeden Fahrzeugs kann ein gemeinschaftliches, kollektives Umfeldmodell erstellt werden. Diese Funktionalität wird als kollektive Perzeption bezeichnet. Ferner gibt es ein Modul zum Bereitstellen der Daten (kollektive Perzeption (Senden)) und ein Modul zum Empfang der Daten (kollektive Perzeption (Empfangen)). Das Sendemodul extrahiert relevante Objekte des lokalen Umfeldmodells und stellt sie den anderen Teilnehmern zur Verfügung. Das Empfangsmodul ist in der Lage, Daten einer geforderten Integrität und Qualität in das lokale Umfeldmodell zu integrieren. Dabei sind Herausforderungen bezüglich Sensordaten unterschiedlicher Aktualität, unbekannter Sensorfehler und eine fehlerfreie Assoziation von Objekten zu lösen. Eine Standardisierung bezüglich übertragungsfähiger Objekte, Integritätsmaße und Daten-Update-Raten vereinfacht den Umgang mit den versandten Daten. Neben Informationen über andere Verkehrsteilnehmer teilen Fahrzeuge ihre Fahrzeugeigenschaften mit. So werden technische Werte wie die Abmessungen, das Gewicht und maximale Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsfähigkeiten kommuniziert.

Die Modellierungsphase übergibt ein kollektiv gefülltes Umfeldmodell an die Planungsphase. Objekte, die nicht Teil des Umfeldmodells sind, können in der Planung nicht berücksichtigt werden. Zudem beinhaltet das Umfeldmodell Informationen bezüglich der Ausmaße und technischen Fähigkeiten der an der Abstimmung teilnehmenden Fahrzeuge. Konzepte zur Modellierung eines kollektiven Umfeldmodells sind in der Literatur zu finden [104].

## Planen

Die Planungsphase ermöglicht die Berechnung gemeinschaftlicher Manöver auf Grundlage des kollektiven Umfeldmodells. Sie beinhaltet ein Modul zur Manöverplanung, welches den Konflikt mittels eines Manöverplans (zukünftig Plan) für alle Beteiligten auflöst. Die Bewegung von Verkehrsteilnehmern, die nicht beeinflusst werden können, wird mittels eines Prädiktionsmodells abgeschätzt. Das Modul kann einen oder mehrere Pläne erzeugen. Beim Vorliegen mehrerer Pläne findet eine Planbewertung der unterschiedlichen Pläne statt. Für diese Bewertung muss ein Standard für die Bewertungsmetrik erarbeitet werden, um eine gleichberechtigte Bewertungen durchführen zu können. Eine besondere Bewertung stellt das Veto dar, welches einen Plan aus der weiteren Betrachtung ausschließt. Kriterien des Vetos sind neben sicherheitskritischen Situationen wie das Verlassen der Fahrbahn oder das Auftreten von Kollisionen auch technisch nicht durchführbare Manöver. Das Veto ist notwendig, um auf fehlende oder falsche Informationen im kollektiven Umfeldmodell zu reagieren, und ermöglicht so das Planen auf einem nicht identischen kollektiven Umfeldmodell. Nach einem zu standardisierenden Verfahren zur Planauswahl wird der beste Plan bestimmt. Eine abschließende Validierung überprüft, ob zwischen der Berechnung des Plans und dem Zeitpunkt der Ausführung nachteilige Veränderungen stattgefunden haben.

Das Ergebnis der Planungsphase ist ein Plan, der bewertet wurde und ausführbar ist. Er beinhaltet Manöver für alle beteiligten Verkehrsteilnehmer und wurde auf Basis des kollektiven Umfeldmodells erstellt. Eine für diese Phase geeignete Planungsmethode wird in Kapitel 5 beschrieben.

## Durchführen

Die Durchführungsphase stellt sicher, dass die geplanten Manöver einerseits durchgeführt und andererseits sicher beendet werden können. Dazu entnimmt die Plandurchführung aus dem Plan die für das eigene Fahrzeug bestimmte Trajektorie. Diese wird dann in Stellgrößen für die fahrzeugeigene Aktuatorik übersetzt und an diese übermittelt. Durch eine kontinuierliche Steuerung oder Regelung der Aktuatorik wird der Plan ausgeführt. Um den sicheren Abschluss der Manöver zu garantieren, überprüft das Modul der Überwachung die Plandurchführung. Dabei werden Abweichungen der Planbefolgung und Veränderungen im Umfeld detektiert. Während ungefährliche Veränderungen keine Gegenmaßnahme nach sich ziehen, können gefährliche Veränderungen eine Anpassung des Plans oder einen Abbruch des Plans mit einer anschließenden Neuplanung bedeuten.

Das Ende der Durchführungsphase ist erreicht, wenn die geplanten Manöver komplett und sicher durchgeführt wurden. Konzepte für das sichere Durchführen von Manövern sind der Literatur zu entnehmen [7, 13, 14]. Die eventgetriebene Konfliktlösung wird im Anschluss deaktiviert und erst durch das Auftreten einer neuerlichen Konfliktsituation aktiv. Der Prozess der Aufgabenkoordination, der eine Abstimmung zwischen mehreren Teilnehmern ermöglicht, wird als kooperative Abstimmung bezeichnet.

## 4.2 Benötigte Nachrichten für die kooperative Abstimmung

Die vernetzte, deliberative Steuerungsarchitektur ermöglicht es, Verhalten mehrerer Fahrzeuge zu koordinieren. Ein wichtiger Aspekt ist die Kommunikation, die den Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen erlaubt. Als Kommunikation wird jeglicher Austausch von Daten zwischen Fahrzeugen verstanden, der im Rahmen dieser Arbeit funkbasiert vorgenommen wird. Dabei bietet sich als Standard die V2V-Kommunikation mittels des European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ITS G5 Standards an. Diese sieht bereits unterschiedliche, standardisierte Nachrichtenformate vor. Den für die kooperative Abstimmung notwendigen Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen können diese Nachrichtenformate jedoch nicht leisten. Daher werden nachfolgend sieben neue Nachrichtentypen definiert und beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass die versandten Nachrichten die Empfänger auch erreichen. An dieser Stelle sei auf Arbeiten verwiesen, die sich mit einem Quality-of-Service für V2V-Nachrichten [308], einem directionalen Broadcast-Protokoll für den Austausch sicherheitsrelevanter Daten in V2V-Netzwerken [19] und einem Fail-Safe-Broadcast-Protokoll für kooperative Fahrzeuge [103] beschäftigen. Außerdem kann die Notwendigkeit der einzelnen Nachrichten nach einem Konzept von Hallé et al. [111] bewertet werden und so unnötig redundante Informationen identifiziert und eliminiert werden.

Abbildung 4.3 zeigt, welche Module welche Nachrichten erzeugen bzw. empfangen können. Die Abbildung zeigt die zwischen den Teilnehmern definierten Nachrichten.

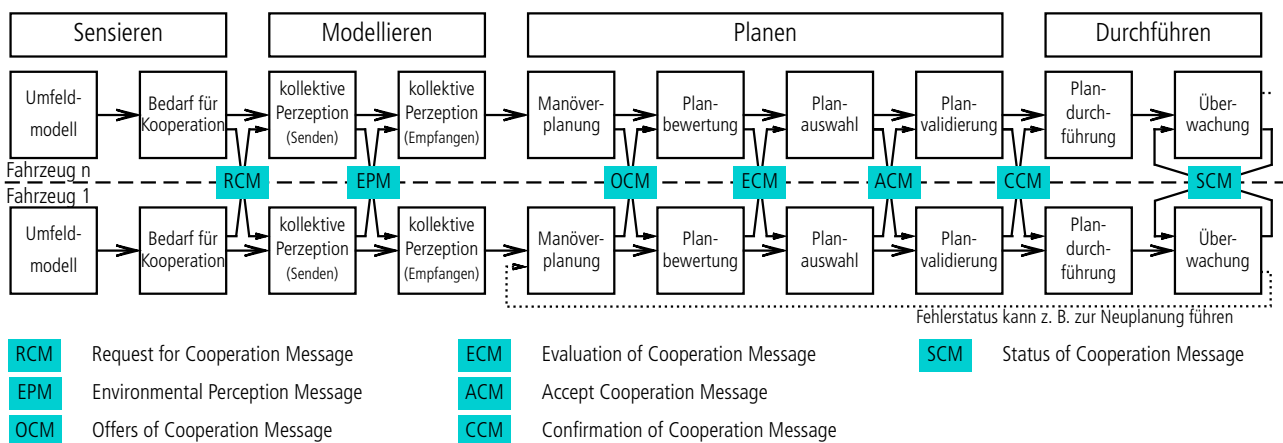


Abbildung 4.3: Architekturvorschlag der kooperativen Abstimmung in Anlehnung an [80].

**Request for Cooperation Message (RCM)**

Die RCM (zu Deutsch: Nachricht zur Anfrage des kooperativen Verhaltens) wird vom Modul *Bedarf für Kooperation* erzeugt und informiert darüber, dass ein Teilnehmer eine potenzielle Konfliktsituation erkannt hat. Mit ihrer Aussendung startet der Prozess der kooperativen Abstimmung. Inhalt der Nachricht ist der Grund für die Kooperationsanfrage, eine Zeitabschätzung bis zum Eintreten des Konflikts und die daraus resultierende Zeitschiene für die nachfolgenden Module. Der Grund für die Kooperationsanfrage kann sicherheits-, komfort- oder effizienzrelevant sein. Es handelt sich um ein konkretes Problem, wie etwa eine wahrscheinliche Kollision zwischen Fahrzeug A und Fahrzeug B. Die Restzeit bis zum Eintreten des Konflikts gibt eine ungefähre Einschätzung für die obere Zeitbegrenzung, die für die kooperative Abstimmung verwendet werden kann. In sicherheitskritischen Situationen kann dies die Time-To-Collision (TTC) sein. Als letztes Merkmal wird für jedes Modul die Zeit definiert, nach der es die eingegangenen Daten verarbeitet. Eingangsdaten, die nach der Startzeit eines Moduls eintreffen, werden ignoriert. Dadurch wird das ständige Verändern der Datengrundlage der Module verhindert und somit ein inkonsistenter Informationsstand der Fahrzeuge, der zu einem anderen Ergebnis (Schwingen des Systems) führen, vermieden. In anderen Worten können die ausgesandten Nachrichten unterschiedlicher Fahrzeuge nur dann berücksichtigt werden, wenn sie im definierten Zeitfenster verteilt und verarbeitet werden.

**Environmental Perception Message (EPM)**

Bei der EPM (zu Deutsch: Nachricht zur kollektiven Perzeption) handelt es sich um eine von der *kollektiven Perzeption* generierte Nachricht, die anderen Teilnehmern Features aus dem lokalen Umfeldmodell zur Verfügung stellt. Bei den Features kann es sich um andere dynamische oder statische Objekte, die Umgebung oder Eigenschaften des eigenen Fahrzeugs handeln.

**Offers of Cooperation Message (OCM)**

Die *Manöverplanung* erzeugt eine OCM (zu Deutsch: Nachricht mit Angeboten des kooperativen Verhaltens), welche Pläne zur Auflösung des erkannten Konflikts enthält. Die Pläne bilden die Grundlage für die nachfolgenden Prozessschritte. Sie sind durchnummeriert und bestehen aus Trajektorien für alle am Konflikt beteiligten Verkehrsteilnehmer. Die Trajektorien müssen jedem Teilnehmer eindeutig zuordenbar sein.

**Evaluation of Cooperation Message (ECM)**

Die durchnummerierten Pläne werden durch die *Planbewertung* bewertet und mittels der ECM (zu Deutsch: Nachricht zur Bewertung des kooperativen Verhaltens) verschickt. In der Nachricht stehen eine individuelle Bewertung der Pläne nach einer vereinbarten Metrik und die Identität des bewertenden Fahrzeugs (Fahrzeug-ID).

**Accept Cooperation Message (ACM)**

Die ACM (zu Deutsch: Nachricht zur Annahme des kooperativen Verhaltens) ist die vom Modul *Planauswahl* ausgesandte Nachricht, welche den durchzuführenden Plan beinhaltet. Da die Bewertung der Fahrzeuge aus einer individuellen Perspektive vorgenommen wird, stellt diese Nachricht sicher, dass sich alle Fahrzeuge auf einen Plan einigen. Da diese Nachricht die am Bewertungsprozess beteiligten Fahrzeuge synchronisieren soll, dürfen Fahrzeuge nur dann eine ACM aussenden, wenn sie auch eine ECM gesandt haben. Im Fall einer zentralen Variante der kooperativen Abstimmung enthält die ACM den durch die zentrale Instanz ausgewählten Plan, da die Bewertung nur von ihr durchgeführt wurde.

**Confirmation of Cooperation Message (CCM)**

Die letzte Nachricht der Planungsphase, die CCM (zu Deutsch: Nachricht zur Bestätigung des kooperativen Verhaltens), wird durch die *Planvalidierung* erstellt und beinhaltet den validierten, durchführbaren Plan. Diese Nachricht ist essentiell für den Beginn der Durchführungsphase, da jeder Teilnehmer des Plans durch die CCM eine verbindliche Zusage zur Durchführung des Plans abgibt. Sie ist durch jeden im Plan vorkommenden Teilnehmer zu versenden.

### Status of Cooperation Message (SCM)

Während der Durchführung wird die SCM (zu Deutsch: Statusnachricht des kooperativen Verhaltens) von der *Überwachung* zyklisch ausgesandt. Mit ihr kann die Planbefolgung der Teilnehmer durch die anderen Teilnehmer bestimmt werden. Dazu werden der aktuelle Fahrzeugzustand und die gefahrene Trajektorie verschickt. Sie ist durch jeden Teilnehmer zu versenden, der im Plan vorkommt.

Die beschriebenen Nachrichten können von allen teilnehmenden Fahrzeugen erstellt und versandt werden. Bei der RCM gibt es die Einschränkung, dass alle Teilnehmer die gleiche Konfliktsituation beschreiben müssen. Im Falle von unterschiedlichen RCM wird nach Wichtigkeit priorisiert (erst Sicherheit, dann Komfort, dann Effizienz) und beim Auftreten zweier Konflikte gleicher Wichtigkeit mit der Zeit bis zum Eintritt und dem Zeitstempel der Nachricht nach weiteren Größen entschieden. Weiterhin gibt es Nachrichten, die von allen Fahrzeugen ausgesandt werden müssen. So sind die CCM als verbindliche Zusage und die SCM als Status zur Planbefolgung notwendige Bestandteile der Kommunikation zur kooperativen Abstimmung. Die RCM, OCM, ECM und ACM müssen von mindestens einem Fahrzeug generiert und versandt werden, da diese Nachrichten den Konflikt feststellen, den durchzuführenden Plan unter den Fahrzeugen verteilen und eine Auswahl vornehmen. Die EPM ist eine optionale Nachricht, da sie die Planungsgrundlage verbessern kann, jedoch nicht in jeder Situation unbedingt notwendig ist. Die Nachrichten RCM, EPM, OCM, ECM, ACM und CCM werden pro Konfliktlösungsversuch einmalig erzeugt und versandt. Der Inhalt der Nachrichten verändert sich mit der Zeit nicht. Die SCM hingegen ist eine zyklisch ausgesandte Nachricht, weil sie den aktuellen Zustand und die geplante Trajektorie des Fahrzeugs beinhaltet. Diese beiden Informationen sind zeitabhängig und deshalb zyklisch zu erneuern. Tabelle 4.1 zeigt die Eigenschaften der definierten Nachrichten auf.

Tabelle 4.1: Nachrichten für die kooperative Abstimmung.

Eigenschaften	Nachrichten						
	RCM	EPM	OCM	ECM	ACM	CCM	SCM
Aufgabe / Ziel	Bedarf feststellen	Umfeldmodell erweitern	Pläne verteilen	Bewertung verteilen	Auswahl verteilen	verbindliche Zusage	Status mitteilen
min. Sender	1	0	1	1	1	alle	alle
max. Sender	alle*	alle	alle	alle	alle	alle	alle
Erzeugung	einmalig	einmalig	einmalig	einmalig	einmalig	einmalig	zyklisch

\* Die RCM muss sich für einen Durchlauf der kooperativen Abstimmung auf denselben Konflikt beziehen.

## 4.3 Eigenschaften und Bewertung der kooperativen Abstimmung

Die kooperative Abstimmung besteht aus Modulen einer vernetzten Steuerungsarchitektur und neu definierten Nachrichten, die zwischen den Teilnehmern verschickt werden. Die Kommunikation wird genutzt, um auftretende Konfliktsituationen zu bewältigen. Dabei kann auch vernetzte Infrastruktur dazu beitragen, ein kollektives Umfeldmodell aufzubauen oder Pläne an Unfallschwerpunkten oder unsignalisierten Kreuzungen zu berechnen und an die beteiligten Fahrzeuge zu versenden. Für die kooperative Abstimmung werden sieben neue Nachrichtentypen definiert, die den Prozess zur gemeinschaftlichen Lösungsfindung ermöglichen. Die Nachrichten, die zur verbindlichen Zusage führen, werden einmalig pro Konfliktsituation erzeugt. Die Statusnachricht hingegen wird zyklisch erzeugt und ausgesandt, um die korrekte Plandurchführung überwachen zu können. Die kooperative Abstimmung kann in den drei Fahrumgebungen Autobahn, Landstraße und Stadt zum Einsatz kommen. Ebenso sind Konfliktsituationen aus dem Bereich der Sicherheit, des Komforts und der Effizienz mit der Abstimmung lösbar. Es handelt sich um einen eventgetriebenen Prozess, dessen Fokus auf der gemeinschaftlichen Konfliktlösung liegt. Daher werden fahrzeugindividuelle Fahrfunktionen nicht explizit berücksichtigt. Die Fahrzeuge, die an der

kooperativen Abstimmung teilnehmen, müssen weder hardware- noch softwaretechnisch identisch sein. Einzig die Arbeitsweise der Module Planbewertung und Planauswahl, die Schnittstellen aller Module und die neuen Nachrichten müssen standardisiert sein. Ebenso ist die Abstimmung durch die Festlegung von Zeiträumen für das Teilnehmen an bestimmten Phasen für  $n$  Fahrzeuge konzipiert. Einerseits ist es möglich, dass Fahrzeuge oder Infrastruktur vom Erkennen einer Konfliktsituation bis zur Planbestätigung alleinig mit der Konfliktlösung beschäftigt ist. Andererseits ist eine gemeinschaftliche Konfliktlösung möglich, bei der mehrere Fahrzeuge oder zusätzlich Infrastruktur bei der Erstellung des kollektiven Umfeldmodells, Berechnung von Plänen sowie bei der Bewertung und Auswahl von Plänen mitwirken. In beiden Fällen ist die verbindliche Zusage in Form der CCM und die SCM als Statusmitteilung während der Plandurchführung notwendig. Die Autonomie der Fahrzeuge ist bei Teilnahme an der Bewertung durch das Veto gegeben. Falls Fahrzeuge nicht am Bewertungsprozess teilnehmen, garantiert die Validierung und die sich anschließende verbindliche Zusage zum Plan ein zweites Vetorecht. Dieses Vetorecht ermöglicht die Planung auf einem nicht identischen Umfeldmodell, dessen Realisierung aufgrund von Synchronisationsproblemen eine Herausforderung darstellen würde. Jeder Teilnehmer hat ein lokales Umfeldmodell, welches um kollektive Features erweitert das kollektive Umfeldmodell ergibt. Die Planung erfolgt dezentral auf mindestens einem der Fahrzeuge oder auf der Infrastruktur. Ein Plan umfasst Trajektorien für alle Teilnehmer und forciert so die global optimierte Auflösung der Situation, die unter den gegebenen Randbedingungen möglich ist. Tabelle 4.2 fasst die Eigenschaften der kooperativen Abstimmung zusammen.

Tabelle 4.2: Eigenschaften der kooperativen Abstimmung.

Eigenschaften		
Kommunikations	-einsatz	✓
	-partner	V2V & V2I
	-nachrichtentypen	7
	-häufigkeit (1x)	RCM, EPM, OCM, ECM, ACM, CCM
	-häufigkeit (zyklisch)	SCM
Anwendung	Umgebungen	Autobahn, Landstraße, Stadt
	Verkehrseigenschaften	Sicherheit, Komfort, Effizienz
	zeitlich	eventgetrieben
	Fahrzeuggruppen	heterogen
Einbeziehung	Teilnehmer	2 bis $n$
	Alleingestaltung möglich	✓
	Mitgestaltung möglich	✓ durch (EPM,) OCM, ECM & ACM
	Stabilität des Systems	✓ durch definierte Zeiträume
	Bestätigung erforderlich	✓ durch CCM und SCM
Autonomie	durch fahrzeug-individuelle Alternative	×
	bei kooperativer Fahrfunktion	✓ durch ECM, CCM und SCM
Umfeldmodell	gemeinsame Erstellung	✓ durch EPM (optional)
	identischer Inhalt notwendig	×
	Speicherort	dezentral
Planung	Berechnung	dezentral
	kooperative Funktion eingebettet	✓
	Planumfang	Trajektorien aller Teilnehmer
	Optimierung	situationsglobal

### Alternative Verwendung durch Derivatbildung

Neben dem zuvor beschriebenen Aufbau der kooperativen Abstimmung gibt es Derivate, die andere Eigenschaften aufweisen. So basiert der Prozess aus Abbildung 4.3 auf einem Situationsinterpretationsmodul, dem nur das lokale Umfeldmodell zur Verfügung steht. Die Situationsinterpretation könnte auch auf Basis des kollektiven Umfeldmodells vorgenommen werden, da einige Konflikte möglicherweise erst durch das Zusammenführen des Wissens aller erkannt werden. Da die ständige Kanallast für die dafür notwendige kollektive Perzeption im derzeitigen Entwicklungsstadium nicht abgeschätzt werden kann, wird von der ressourcenschonenden Variante aus Abbildung 4.3 ausgegangen. Ebenso ist es möglich, dass die CCM zukünftig keine Relevanz mehr besitzt, da durch die ACM schon eine Planauswahl, also eine Art Bestätigung versandt wird.

### Einordnung und Bewertung

Die Einordnung und Bewertung der kooperativen Abstimmung wird mittels eines Vergleichs mit dem Stand der Wissenschaft und Technik durchgeführt. Dabei sollen Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Architekturvorschlägen herausgearbeitet und in Tabelle 4.3 gegenübergestellt werden.

Tabelle 4.3: Gegenüberstellung von Anforderungen und Architekturvorschlägen.

Anforderungen	Architekturvorschläge					kooperative Abstimmung
	PATH	Demo 2000	Auto21	SFB/TR 28	Caveney	
Einsatz von Kommunikation	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kommunikationspartner (V2V und V2I)	✓	✓	✓		✓	✓
Anwendung in allen Umgebungen				✓	✓	✓
Anwendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz					✓	✓
heterogene Fahrzeuggruppen						✓
Aufbau eines gemeinsamen Umfeldmodells	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Alleingestaltung der Lösung	✓	✓	✓	✓	×	✓
Mitgestaltung der Lösung						✓
Schleifen verhindern	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	✓
Autonomiewahrung in kooperativer Fahrfunktion	✓	✓	✓		×	✓
dezentrale Planung			(✓)	✓	✓	✓
Planumfang Trajektorien aller Teilnehmer				✓		✓

Die Tabelle macht deutlich, dass die hier entwickelte kooperative Abstimmung alle Anforderungen der zweiten Forschungsfrage erfüllt. Die Punkte der **heterogenen Fahrzeuggruppen** und der **Mitgestaltung** bei der Lösungsfindung **sind Merkmale, die in keinem anderen Vorschlag vorkommen**. Auch die **dezentrale Planung bei gleichzeitiger Wahrung der Autonomie** stellt ein besonderes Merkmal dar. Der **Planumfang von Trajektorien für alle Teilnehmer und die Einbindung von Infrastruktur** ist ein weiteres **Alleinstellungsmerkmal der kooperativen Abstimmung**.

Es zeigt sich, dass die kooperative Abstimmung sowohl neue Merkmale als auch neue Kombinationen bekannter Eigenschaften beinhaltet und Neuigkeitswert besitzt.



## 4.4 Zusammenfassung des Kapitels

Das Kapitel hat die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, also der Frage nach einer Aufgabenkoordination für ein fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem, zum Ziel. Dazu wird eine deliberative Steuerungsarchitektur um Aspekte für den Einsatz als vernetzte Steuerungsarchitektur erweitert. Der Fokus liegt auf der Anpassung der Schnittstellen der Module zur Ermöglichung des Informationsaustausches zwischen den Fahrzeugen. Die Nachrichten, die den Informationsaustausch ermöglichen sollen, werden definiert. Sie beinhalten Informationen zu einem zu lösenden Problem (RCM), der Umgebung (EPM), geplanten Fahrmanövern (OCM), bewerteten Fahrmanövern (ECM), der Annahme des ausgewählten Plans (ACM) und der verbindlichen Bestätigung aller Teilnehmer (CCM). Zudem gibt es eine zyklisch ausgesandte Nachricht, die den Status aller Teilnehmer übermittelt (SCM). Die aus den Anpassungen der Steuerungsarchitektur und dem Hinzufügen der Nachrichten resultierenden Eigenschaften werden aufgezeigt. Die als kooperative Abstimmung bezeichnete vernetzte Steuerungsarchitektur wird mit dem Stand der Wissenschaft und Technik verglichen. Es zeigt sich, dass gerade die Mitgestaltung und die Verarbeitung heterogener Fahrzeuggruppen ein Alleinstellungsmerkmal darstellt. Auch die Kombination der dezentralen Planung und der Wahrung der Autonomie ist zusammen mit der Einbindung der Infrastruktur bei gleichzeitiger Planung für alle Teilnehmer eine Besonderheit der kooperativen Abstimmung. Da alle Anforderungen der zweiten Forschungsfrage erfüllt werden, kann die gesuchte Aufgabenkoordination durch die vorgestellte kooperative Abstimmung dargestellt werden.

**Die Forschungsfrage bezüglich einer Aufgabenkoordination für ein fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem ist durch die Methode der kooperativen Abstimmung beantwortet.**



# 5 Fahrmanöverkoordination mehrerer Teilnehmer

Der Stand der Wissenschaft und Technik zeigt unterschiedliche Fahrmanöverkoordinationsmethoden auf, wobei ein Abgleich mit den Anforderungen belegt, dass keine derzeit verfügbare Methode alle Anforderungen erfüllt. Daher wird in diesem Kapitel eine Methode zur Fahrmanöverkoordination mehrerer Teilnehmer erarbeitet, die eine Aufgabe in der kooperativen Abstimmung darstellt.

Die Methode der Fahrmanöverkoordination mehrerer Teilnehmer basiert auf einigen Randbedingungen wie beispielsweise ein vollständiges Umfeldwissen und die Übertragbarkeit der ermittelten Lösung mittels funkbasierter Kommunikation, die in Abschnitt 5.1 erläutert werden. Zudem wird die Grundidee der Manöverplanungsmethode, die auch als kooperative Manöverplanung bezeichnet wird, ausgeführt. Sie besteht aus drei Modulen, die in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt werden. Dabei geht Abschnitt 5.2 auf das Modul der Planerzeugung ein, welches unterschiedliche Pläne, bestehend aus sicheren Endzuständen und sicheren Trajektorien zu diesen Endzuständen berechnet. Abschnitt 5.3 beschreibt die Planbewertung, die den unterschiedlichen Plänen mittels eines definierten Kostenfunktionalis Kosten zuweist. Abschnitt 5.4 thematisiert schließlich die Möglichkeiten der einerseits zentralen und andererseits dezentralen Planauswahl. In Abschnitt 5.5 wird auf die Verwendung der kooperativen Manöverplanung in Mischverkehrsszenarien eingegangen, wenn also nicht alle Teilnehmer mit der vorgestellten Methode ausgestattet sind. Abschnitt 5.6 befasst sich mit einer detaillierten Beschreibung und der Bewertung der kooperativen Manöverplanung. Schließlich fasst Abschnitt 5.7 die Erkenntnisse des Kapitels zusammen und reflektiert die dritte Forschungsfrage.

Die Ziele des Kapitels sind demnach

1. das Prinzip der kooperativen Manöverplanung zu erläutern,
2. die Schritte innerhalb der Planungsmethode zu beschreiben,
3. die Verwendung der Methode bei inhomogenen Fahrzeugpopulationen zu skizzieren,
4. die kooperative Manöverplanung einzuordnen und zu bewerten, sowie
5. die Beantwortung der dritten Forschungsfrage zu reflektieren.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Methode wurde bereits auszugsweise vom Autor veröffentlicht [57, 58, 60].

## 5.1 Prinzip der kooperativen Manöverplanung

Die kooperative Manöverplanung ist eine Planungsmethode, die es erlaubt, Fahrmanöver zwischen mehreren Verkehrsteilnehmern zu koordinieren. Dabei sollen die zuvor definierten Anforderungen erfüllt werden. Dem Algorithmus werden alle Informationen bezüglich der Fahrumgebung, der Fahrzeuge und der Fahrer zur Verfügung gestellt. Diese Informationen umfassen geometrische Beschreibungen der Fahrumgebung und der Verkehrsteilnehmer, Positionen, Geschwindigkeiten und Fähigkeiten in Form von Beschleunigungs- und Verzögerungsvermögen. Weitere Informationen können Fahrerwünsche bezüglich eines favorisierten Geschwindigkeitsbereichs, die Akzeptanz für Quer- und Längsbeschleunigungen oder andere Parameter darstellen. Die kooperative Manöverplanung verarbeitet diese Informationen unter der Annahme der Gleichberechtigung der Verkehrsteilnehmer. In anderen Worten wird keine Priorisierung oder Vorauswahl vorgenommen, sodass die bestmögliche Lösung gefunden werden kann.

Die Grundidee der kooperativen Manöverplanung ist die sukzessive Verringerung des Suchraums auf technisch sinnvolle Lösungen. Ausgehend von Modellen der Fahrzeugbewegung wird unter Berücksichtigung der Fahrfähigkeiten mit der Berechnung von Zielpunkten begonnen. Diese stellen die Endpunkte eines Bewegungsplans für jeden Teilnehmer dar und umfassen ausschließlich die Menge technisch möglicher, ansteuerbarer Punkte. Diese Menge wird mittels einer Risikoanalyse auf die Menge sicherer Endzustände reduziert. Sichere Endzustände sind Zustände, die einen sicheren (zeitlichen und räumlichen) Punkt zur Fahrerübergabe darstellen, da keine unmittelbaren Konflikte zu erwarten sind. Diese sicheren Endzustände werden durch eine Vielzahl von Trajektorien mit dem Ausgangszustand verbunden, um diskret den kontinuierlichen Raum von Handlungsmöglichkeiten abzubilden. Jeder sichere Zielpunkt wird mit jeder zu ihm führenden Trajektorie von allen Teilnehmern mit allen anderen Zielpunkt-Trajektorienpärchen kombiniert. Dementsprechend wird keine Entkopplung der Teilnehmer durch Priorisierung oder eine a-priori-Auswahl von Trajektorien oder Zielpunkten durchgeführt, um den Suchraum der Lösung möglichst wenig einzuschränken. Alle Kombinationen werden im Hinblick auf Kollisionsfreiheit überprüft und verworfen, falls sie kollisionsbehaftet sind. Kollisionsfreie Kombinationen werden hinsichtlich ihres Nutzen für die Teilnehmer quantifiziert und gelistet. Sofern der Konflikt kollisionsfrei lösbar ist, ist das Ergebnis mindestens ein Bewegungsplan mit einem sicheren Zielpunkt und einer sicheren Trajektorie für jeden Teilnehmer. Dieser kann vom Berechner nun mittels beispielsweise funkbasierter Kommunikation an die anderen Teilnehmer zur Validierung und Durchführung übermittelt werden. Ist eine Konfliktsituation zum Beispiel aufgrund physikalischer Einschränkungen nicht kollisionsfrei lösbar, so wird kein Bewegungsplan berechnet.

Ein Ablaufdiagramm der kooperativen Manöverplanung ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Der hierarchische Aufbau der Methode erlaubt eine schrittweise Abarbeitung der Einzelprobleme in Modulen, die die Planung von Manövern für mehrere Teilnehmer hinsichtlich der Komplexität handhabbar gestaltet. Es handelt sich bei den drei Modulen um die Planerzeugung, die Planbewertung und die Planauswahl, die durch den modularen Aufbau prinzipiell austauschbar sind. Weiterhin erlaubt die Modularität die Anpassungen einzelner Module, ohne dass das Konzept der kooperativen Manöverplanung verändert werden müsste. Auch innerhalb der Module sind klare Schnittstellen definiert, die das Einsetzen neuerer Untermodule ermöglichen. Diese Untermodule könnten beispielsweise detaillierte Modelle einer höheren Genauigkeit enthalten und daher qualitativ bessere Teillösungen hervorbringen. Nachfolgend sind die einzelnen Module und Untermodule erläutert.

Die Planerzeugung berechnet sichere Zielpunkte durch die Bestimmung aller technisch möglichen Zielpunkte zu einem Zeitpunkt  $T$ . Diese Zielpunkte werden mithilfe der Risikoanalyse der Zielpunkte als *sicher* oder *unsicher* deklariert. Zu allen sicheren Zielpunkten wird eine Trajektorien-schar bestehend aus Trajektorien mehrstufiger Polynome erzeugt, die den Ausgangszustand mit dem jeweiligen Zielpunkt verbindet. Die Risikoanalyse der Trajektorien untersucht nun alle Trajektorienkombinationen der Teilnehmer und bestimmt jede bestehende Kombination als *sichere* oder *unsichere* Kombination. Alle *sicheren* Trajektorienkombinationen mit ihren *sicheren* Zielpunkten werden als Bewegungspläne bzw. Pläne bezeichnet und stellen den Ausgang des Moduls Planerzeugung dar. Diese Bewegungspläne sind als Eingang der Planbewertung definiert. Sie hat nun die Aufgabe, eine

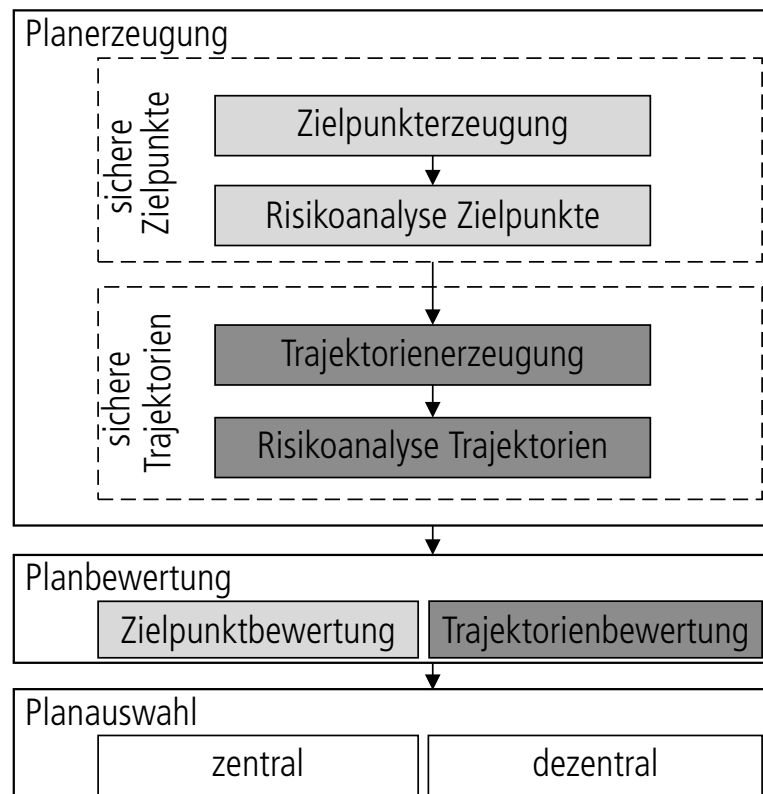


Abbildung 5.1: Ablauf der kooperativen Manöverplanung [58].

Priorisierung der sicheren Pläne aufzustellen. Dazu werden sowohl die Zielpunkte als auch die Trajektorien aller Teilnehmer bewertet. Für die Bewertung kommen Komfortgrößen, Effizienzbetrachtungen und Sicherheitskriterien in Frage, worauf aufbauend die Planbewertung eine Liste von bewerteten Plänen ausgibt. Die Planauswahl kann nun von einer zentralen oder einer dezentralen Planungseinheit ausgeführt werden. Beispiele für zentrale Planungseinheiten sind per StVO bevorrechtigte Sondereinsatzfahrzeuge oder am Straßenrand aufgestellte Straßeninfrastruktur. Eine dezentrale Planung wird in allen anderen Fällen, also in Abwesenheit von bevorrechtigten Instanzen, Anwendung finden. Dabei kann jeder Teilnehmer direkt oder indirekt Einfluss auf die Planauswahl nehmen. Eine Möglichkeit ist die vorherige Übermittlung der Fahrerpräferenzen zur Berücksichtigung während des Bewertungsprozesses. Dieses Vorgehen erfordert ein gemeinsames Verständnis von Fairness. Eine andere Möglichkeit besteht in einem verteilten Bewertungsprozess, bei dem alle Teilnehmer alle Pläne gemeinsam bewerten und sich für einen Plan entscheiden.

Das Ergebnis der kooperativen Manöverplanung ist ein sicherer, kollisionsfreier Bewegungsplan für die Teilnehmer, um eine beispielsweise sicherheitskritische Situation zu bewältigen. Es wird davon ausgegangen, dass sich alle Teilnehmer an den berechneten Plan halten, der Plan technisch umsetzbar ist und es keine unvorhergesehenen Änderungen im Umfeld gibt. Die Gewährleistung dieser Annahme, die Detektion der Verletzung dieser Annahme und die Berechnung von möglichen Gegenmaßnahmen wird vom Überwachungsmodul, auf das in Abschnitt 4.1 verwiesen und in [14] beschrieben ist, übernommen.

## 5.2 Modul I - Planerzeugung

Die Planerzeugung berechnet kollisionsfreie Bewegungspläne, die aus sicheren Zielpunkten und sicheren Trajektorien für alle Teilnehmer bestehen. Die dafür nötigen Untermodule sind die Zielpunkterzeugung (Abschnitt 5.2.1), die Risikoanalyse der Zielpunkte (Abschnitt 5.2.2), die Trajektorienerzeugung (Abschnitt 5.2.3), sowie die Risikoanalyse der Trajektorien (Abschnitt 5.2.4). Im Folgenden werden diese Untermodule detailliert erläutert.

### 5.2.1 Zielpunkterzeugung

Ein Zielpunkt (ZP) steht für einen physikalisch erreichbaren Zustand eines Fahrzeugs zu einem definierten Zeitpunkt  $T$  aus einem Startpunkt (SP). Die Punkte beschreiben die Position des geometrischen Mittelpunkts des Fahrzeugs  $x, y$ , die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ , die Längsbeschleunigung  $a_{\text{Längs}}$ , die Querbewegung  $a_{\text{Quer}}$  und den Gierwinkel  $\psi$ . Am Beispiel des Zielpunkts werden die relevanten Größen für einen beliebigen Zeitpunkt  $t_A$  in Formel 5.1 dargestellt.

$$\text{ZP} = \{x, y, v, a_{\text{Längs}}, a_{\text{Quer}}, \psi\}^{t_A} \quad (5.1)$$

Das zugrundeliegende Koordinatensystem inklusive der Straßenumgebung und eines Fahrzeugs mit den Zustandsgrößen ist in Abbildung 5.2 gezeigt und orientiert sich an gängigen Richtlinien.

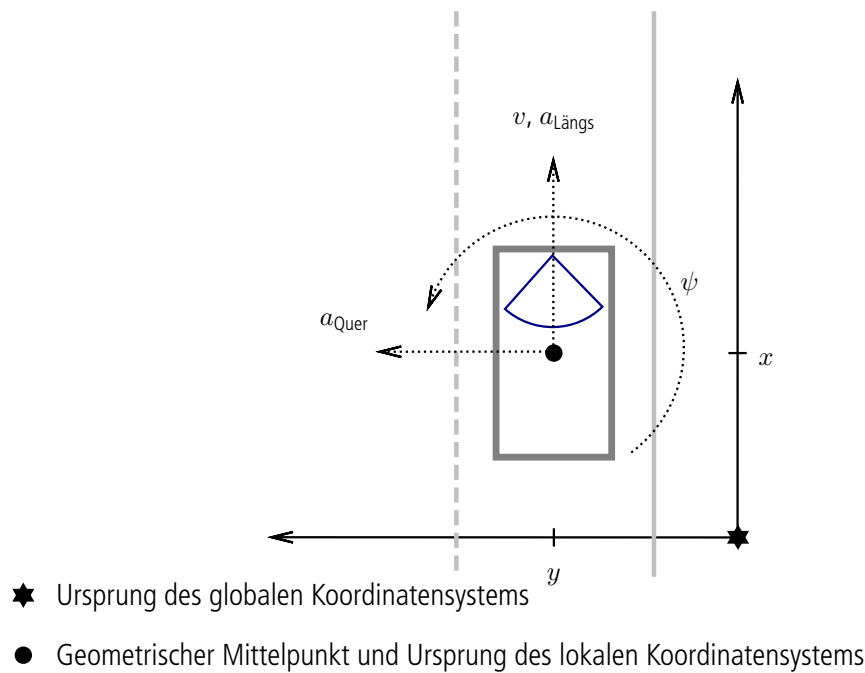


Abbildung 5.2: Definition des Koordinatensystems der kooperativen Manöverplanung.

Der Grundidee der kooperativen Manöverplanung entsprechend werden Zielpunkte als technisch mögliche und anfahrbare Punkte bestimmt, die in einem sukzessiv verringerten Suchraum liegen. Abbildung 5.3 zeigt ein Fahrzeug zu einem Zeitpunkt  $t_0$  auf der Straße, dessen Aufenthaltsraum (= Raum von Zielpunkten) zum Zeitpunkt  $t_1$  bestimmt werden soll. Dabei gibt das gestrichelte, theoretisch unendlich große Viereck den größtmöglichen, nicht plausibilisierten Raum an Zielpunkten an. Die Punkte, die sich in diesem Raum befinden, unterliegen also keiner Überprüfung hinsichtlich fahrphysikalischer oder zeitlicher Einschränkungen. Durch die Berücksichtigung dieser Einschränkungen wird der Raum an Zielpunkten, der in der Abbildung gepunktet dargestellt ist, kleiner. Dieser als Erreichbarkeitsmenge des Fahrzeugs bezeichnete Raum begrenzt die Zielpunkte auf technisch plausible Zielpunkte und fokussiert die Komplexität für die nachfolgenden Schritte auf plausible Zielpunkte. Eine weitere Reduzierung des Raums ist durch eine Erreichbarkeitsmenge gegeben, die ausschließlich Zielpunkte beinhaltet, die parallel zum Verlauf der Fahrbahn ausgerichtet sind und das Fahrzeug somit in eine neutrale und sichere Fahrzeugausrichtung überführen. Diese Erreichbarkeitsmenge ist mit durchgezogenen Linien dargestellt.

Die zur Berechnung der Erreichbarkeitsmenge notwendigen Rechenvorschriften werden im Folgenden erläutert. Die Erreichbarkeitsmenge wird durch diskret berechnete Zielpunkte beschrieben, indem jeder Zielpunkt als Endpunkt einer Modelltrajektorie abgespeichert wird. Die verwendeten Modelltrajektorien sind in Abbildung 5.4 zu sehen, wobei die dünnen Punkte Stützpunkte und die dicken Punkte Zielpunkte darstellen. Sie beinhalten Beschleunigung/Verzögerung, Lenkmanöver und eine Kombination aus beidem. Somit stellt ein Zielpunkt

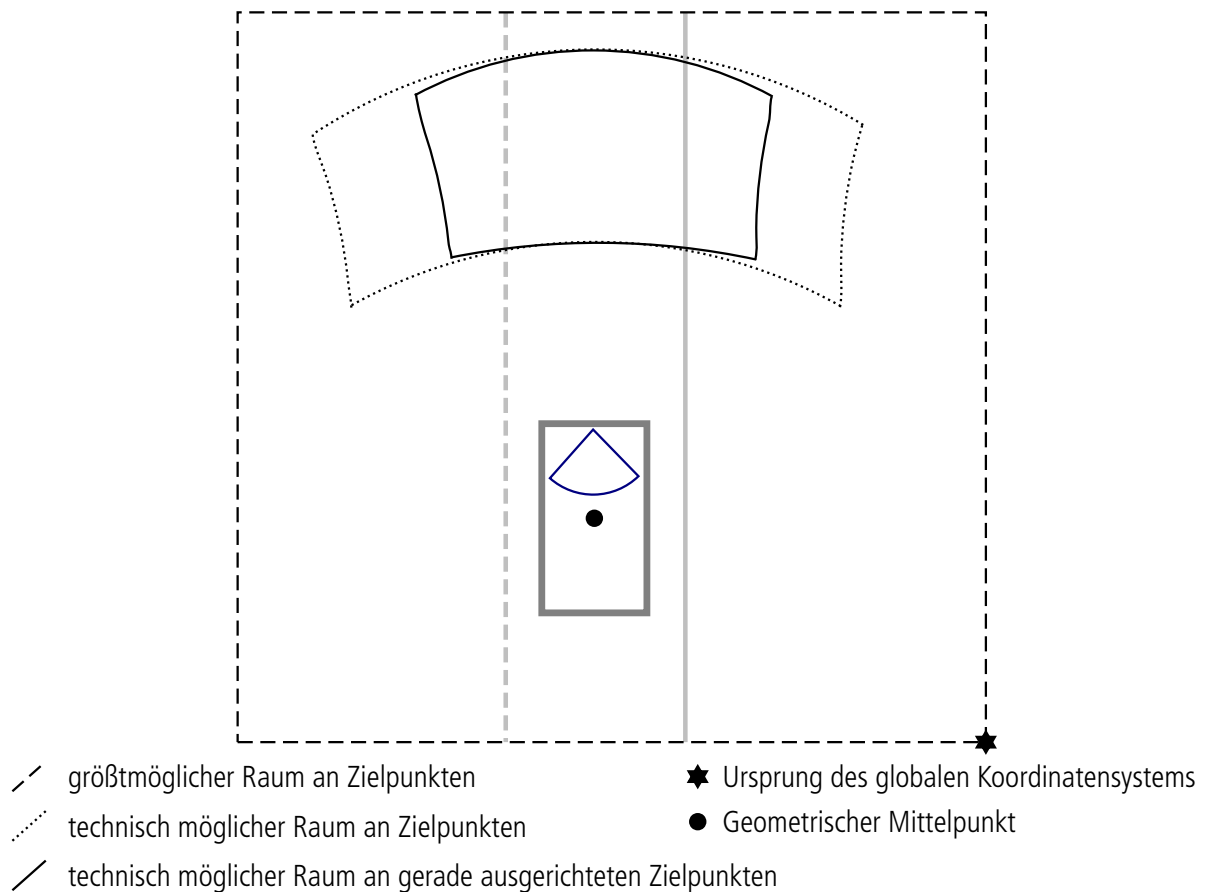


Abbildung 5.3: Konzept zur Ermittlung der Zielpunkte.

einen Fahrzeugzustand dar, der in einem Zeitintervall ausgehend von einer Startposition  $x_0, y_0$ , einer Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$ , einer Anfangsfahrzeugausrichtung  $\psi_0$  und Anfangsbeschleunigungen  $a_{\text{Längs}}, a_{\text{Quer}}$  erzeugt werden kann. Die Trajektorie, die den Start- und den Zielpunkt miteinander verbindet, wird so modelliert, dass sie den Bedingungen des Kammschen Reibungskreises und den nichtholonomen Fahrzeugeigenschaften genügt. Somit werden näherungsweise realistische Zielpunkte mithilfe einfacher physikalischer Modelle erzeugt.

Wie Abbildung 5.4 zeigt, gibt es Modelltrajektorien, die unterschiedliche Randbedingungen erfüllen. In drei Schritten soll daher erklärt werden, wie die drei unterschiedlichen Modelltrajektorien anhand von Startpunkten berechnet werden können. Dazu wird zunächst auf die Berechnung von geraden Modelltrajektorien (geradlinige Bewegung) eingegangen. Anschließend wird das Lenken in der Berechnung des Endzustands (lenkende Bewegung) berücksichtigt. Abschließend wird das Erzeugen einer Modelltrajektorie beschrieben, die einen Endzustand erzeugt, der parallel zu einem Anfangszustand ist (lenkende Bewegung, die parallel zum Anfangszustand endet).

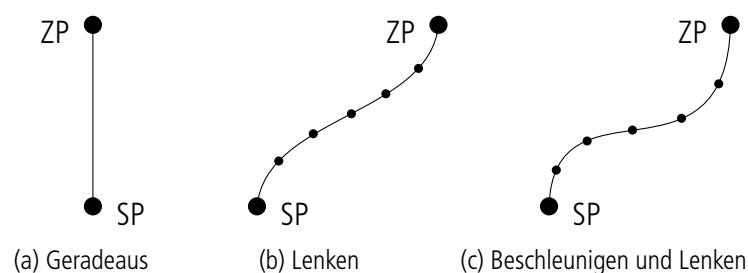


Abbildung 5.4: Modelltrajektorien unterschiedlicher Manöver in Anlehnung an [60].

### Geradlinige Bewegung

Die Modelltrajektorien werden auf Basis einer gleichmäßigen Beschleunigung  $a_{\text{Längs}}$  berechnet. Diese führt mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  und dem wirkenden Zeitintervall  $t \in [0, T]$  zum zurückgelegten Weg  $s(t)$ . Formel 5.2 zeigt die verwendete Formel und die geltenden Beschränkungen.

$$s(t) = \frac{1}{2} \cdot a_{\text{Längs}} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \quad (5.2)$$

$$t \in [0, T]; a_{\text{Längs}} \in [a_{\text{Längs, min}}, a_{\text{Längs, max}}]; v_0 + a_{\text{Längs}} \cdot t \in [0, v_{\text{max}}]$$

Die Beschränkungen sind die maximal mögliche Beschleunigung und die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs. Weiterhin wird eine negative Geschwindigkeit, also ein Rückwärtsfahren des Fahrzeugs, nicht zugelassen. Die Umrechnung des Weges in einen Zielpunkt in kartesische Koordinaten kann mit der Fahrzeugausrichtung (Formel 5.3) direkt vorgenommen werden.

$$y = s \cdot \sin(\psi) \quad (5.3)$$

$$x = s \cdot \cos(\psi)$$

Abbildung 5.4a zeigt den Zielpunkt der geraden Modelltrajektorie zu einem Zeitpunkt nach Erreichen der Manöverdauer  $T$ .

### Lenkende Bewegung

Modelltrajektorien, die Lenken beinhalten sollen und gleichzeitig fahrbar sind, müssen neben den in Formel 5.2 beschriebenen Abhängigkeiten weitere Randbedingungen erfüllen. Die Kriterien umfassen die Nutzung realistischer Fahrradien und die Einhaltung von Stabilitätskriterien, die hier durch den Kammschen Reibungskreis modelliert werden. Die beschriebenen Randbedingungen erlauben bei Festsetzung des Startzustands SP und der Beschleunigungen die Erzeugung von Modelltrajektorien mit unterschiedlichen Fahrradien. Es sollen im Folgenden immer die Modelltrajektorien mit dem kleinstmöglichen Fahrradius verwendet werden, damit die größtmögliche Erreichbarkeitsmenge berechnet wird (Maximalbetrachtung). Dies hat zur Folge, dass sich der Fahrradius bei einer nicht gleichförmigen Bewegung über die Zeit verändern kann.

Die Einbeziehung der zusätzlichen Randbedingungen und die Änderung des Fahrradius über die Zeit erfordert eine erweiterte Rechenvorschrift. Die Rechenvorschrift basiert auf einer Iteration zur Berechnung von Stützpunkten, die auf dem Weg zum Endzustand notwendig sind. Die Stützpunkte sind in den Abbildungen 5.4b und 5.4c in Form von kleinen Punkten angedeutet. Abbildung 5.5 zeigt die Erreichbarkeitsmenge bestehend aus geradlinigen und lenkenden Modelltrajektorien, wobei die äußeren Grenzwerte des Aufenthaltsraums durch die gepunktete, konvexe Hülle dargestellt sind. Punkte außerhalb dieser Hülle sind im betrachteten Zeitintervall phy-

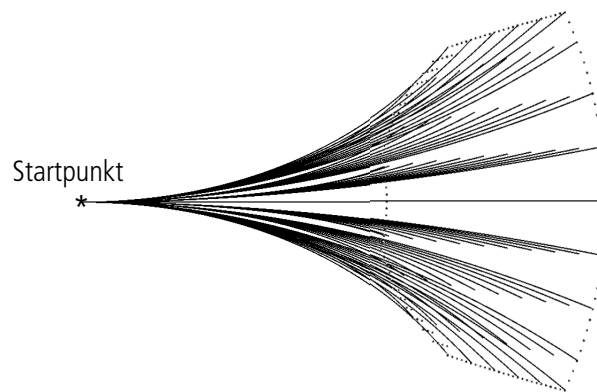


Abbildung 5.5: Form einer Erreichbarkeitsmenge (gepunktet) und Modelltrajektorien mit einmalig lenkender Bewegung (durchgezogen) von einem Startpunkt (links) zu vielen Endzuständen (rechts).



sikalisch nicht erreichbar. Dabei beschreibt diese Erreichbarkeitsmenge Punkte, die einen Zielpunkt ausgehend von einem Startpunkt mit einer bestimmten, aber nicht vordefinierter Fahrzeugausrichtung erreichen.

Die Modelltrajektorien werden mittels einer iterativen Näherung über trigonometrische Beziehungen innerhalb eines rechtwinkligen Dreiecks berechnet. Das Dreieck ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Iteration geht vom Startpunkt A aus und berechnet den Zielpunkt B über die zurückgelegte Entfernung als Bogenlänge. Der der Bogenlänge zugrundeliegende Fahrradius wird für ein bestimmtes Zeitintervall  $t$  konstant gehalten. Für die nächste Iteration wird der Punkt B als neuer Startpunkt A bestimmt und die Iteration solange durchgeführt, bis der Zeitpunkt  $T$  erreicht, und somit der Zielpunkt berechnet ist. Mit dieser Rechenvorschrift ist es möglich, Modelltrajektorien für lenkende, beschleunigte Bewegungen zu berechnen. Für den ersten Punkt startet die Iteration mit dem SP. Um den ersten Stützpunkt B zu berechnen, sind die Größen des gefahrenen Fahrradius  $r$ , die Gierwinkeländerung  $\Delta\psi$  und der zurückgelegten Strecke zu bestimmen. Die Winkel  $\gamma$  und  $\phi$  des Dreiecks stellen Hilfswinkel zur Berechnung dar. Das Ziel ist die Bestimmung des Zustands des Fahrzeugs im nächsten Punkt. Als erstes sollen die Koordinaten bestimmt werden. Sie lassen sich aus dem Dreieck mittels Formel 5.4 berechnen.

$$\begin{aligned}\Delta y &= \overline{AB} \cdot \cos(\gamma) \\ \Delta x &= \overline{AB} \cdot \sin(\gamma)\end{aligned}\tag{5.4}$$

Die Bestimmung der Koordinaten erfordert zunächst die Berechnung des unbekannten Hilfswinkels  $\gamma$  des gleichschenkligen Dreiecks und der Sehne  $\overline{AB}$ . Die Sehne lässt sich mithilfe von Formel 5.5 bestimmen, während der Hilfswinkel sich über die Summe der Innenwinkel zur Fahrzeugausrichtung in Beziehung setzen lässt (Formel 5.6).

$$\overline{AB} = 2 \cdot r \cdot \sin\left(\frac{\Delta\psi}{2}\right)\tag{5.5}$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \phi\tag{5.6}$$

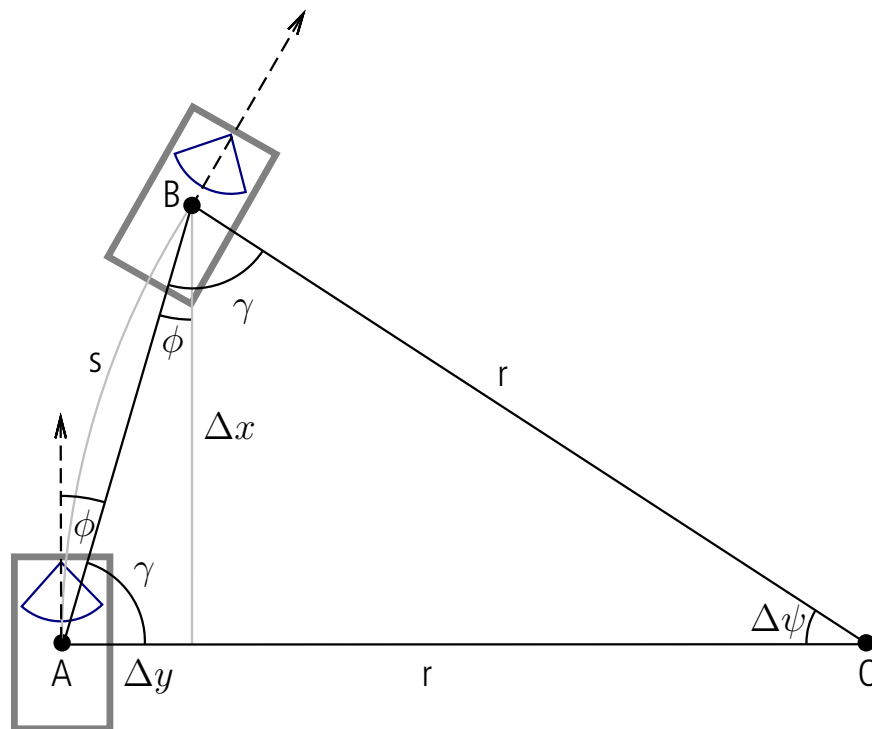


Abbildung 5.6: Beziehung zwischen den Variablen zur Berechnung von Modelltrajektorien mit einer lenkenden Bewegung in Anlehnung an [60].

Die Lösung von Formel 5.5 benötigt die Bestimmung des Fahrradius  $r$  und der Gierwinkeländerung  $\Delta\psi$ . Zunächst wird der minimal befahrbare Fahrradius in Abhängigkeit der Geschwindigkeit  $v(t)$  und der Querbesehleunigung  $a_{\text{Quer}}$  mittels Formel 5.7 bestimmt.

$$r = \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot \Delta t + v_0)^2}{a_{\text{Quer}}} \quad (5.7)$$

Die Modellierung der physikalischen Randbedingungen findet, wie in Formel 5.8 gezeigt, durch die Anwendung des Kammschen Reibungskreises statt.

$$\begin{aligned} F_z^2 &\geq F_x^2 + F_y^2 \rightarrow (\mu \cdot g)^2 \geq a_{\text{Längs}}^2 + a_{\text{Quer}}^2 \\ a_{\text{Quer}} &\leq \sqrt{(\mu \cdot g)^2 - a_{\text{Längs}}^2} \wedge \dot{a}_{\text{Quer}} = 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

Mit einem bekannten Reibbeiwert  $\mu$  kann der minimal befahrbare Fahrradius durch Einsetzen von Formel 5.8 in Formel 5.7 berechnet werden. Ein kleiner Reibbeiwert, also eine schlechte Übertragung der Kraft vom Fahrzeug auf die Straße durch beispielsweise Nässe oder Glatteis, sorgt für einen größeren minimal befahrbaren Fahrradius. Dies lässt sich anschaulich dadurch erklären, dass weniger Kraft von den Rädern zur Kurvenfahrt übertragen werden kann und der minimal befahrbare Fahrradius somit mehr der Geradeausfahrt (Fahradius unendlich groß) entspricht als bei mehr Kraftübertragungspotenzial.

Für Formel 5.5 muss ferner die Gierwinkeländerung  $\Delta\psi$  bestimmt werden. Sie ergibt sich als Projektion der zurückgelegten Strecke  $s$  auf den Umfang eines Kreises mit dem Fahradius  $r$ , wie durch Formel 5.9 beschrieben.

$$\Delta\psi = \frac{s}{r} \quad (5.9)$$

Mit dem Fahradius  $r$  aus Formel 5.7 und der zurückgelegten Strecke  $s$  aus Formel 5.2 ergibt sich für ein Zeitintervall  $\Delta t$  die Sehne  $\overline{AB}$  mithilfe von Formel 5.5 zur Verwendung in Formel 5.4.

Formel 5.6 erfordert die Berechnung des Hilswinkels  $\phi$ , der durch die innen liegenden Winkel des Dreiecks und Ersetzen von  $\gamma$  bestimmt werden kann (Formel 5.10).

$$\phi = \frac{\Delta\psi}{2} \quad (5.10)$$

Somit sind alle Werte zum Bestimmen von Punkt  $B$  bekannt: Die Änderung der kartesischen Koordinaten  $x, y$  wird mithilfe von Formel 5.4 bestimmt. Die Geschwindigkeit ergibt sich aus der aktuellen Geschwindigkeit und der Beschleunigung für ein Zeitintervall  $\Delta t$ , wobei physikalische Randbedingungen der Beschleunigungen  $a_{\text{Längs}}$  und  $a_{\text{Quer}}$  mittels des Kammschen Reibungskreises aus Formel 5.8 modelliert werden. Für nachfolgende Iterationsschritte wird das Dreieck um den Winkel  $\Delta\psi_{\text{Summe}}$  gedreht, um der jeweils neuen Fahrzeugausrichtung Rechnung zu tragen. Formel 5.11 zeigt diesen zu berücksichtigenden Winkel.

$$\Delta\psi_{\text{Summe}} = \sum_{t=t_0}^T \Delta\psi(t) \quad (5.11)$$

Die Iteration ist beendet, wenn die Zeitgrenze  $T$  erreicht ist. Die so erzeugten Modelltrajektorien beinhalten ein Lenkmanöver und enden daher mit einer Fahrzeugausrichtung, die ungleich der Anfangsfahrzeugausrichtung sind. Da die Fahrzeugausrichtung nicht korrigiert wird, würde eine Vielzahl der Modelltrajektorien die Straße auf geraden Straßenabschnitten verlassen.

### Lenkende Bewegung, die parallel zum Anfangszustand endet

Um Modelltrajektorien zu erzeugen, die Zielpunkte mit einer Fahrzeugausrichtung parallel zur Fahrbahn beinhalten und somit für gerade Straßenabschnitte geeignet sind, müssen zusätzliche Randbedingungen eingeführt werden. Unter der Annahme, dass das Fahrzeug zum Startzeitpunkt des kooperativen Manövers  $t_0$  eine parallel zur Fahrbahn orientierte Fahrzeugausrichtung aufweist, muss bei den einfachsten lenkenden Bewegungen das Fahrzeug gleichviel Gierwinkel auf- wie abbauen, um nach Beendigung des Manövers  $t_1$  wieder parallel zur Fahrbahn orientiert zu sein. Analog zu den Fahrradien ergibt sich selbst mit dieser Einschränkung eine Vielzahl von Modelltrajektorien. Es wird die Modelltrajektorie gesucht, die den spätestmöglichen Gegenlenkzeitpunkt beinhaltet. Diese wird durch das Gleichsetzen des Integrals der Gierwinkeländerung  $\Delta\psi(t)$  bis zum Gegenlenkzeitpunkt  $t_{GL}$  und des Integrals der Gierwinkeländerung nach dem Gegenlenkzeitpunkt berechenbar. Formel 5.12 zeigt diese Abhängigkeit und die Berechnung der Gierwinkeländerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und dem gefahrenen Fahrradius. Zu beachten ist, dass der Fahrradius während der Änderung der Fahrzeugausrichtung den Wendekreis  $r_{\min}$  nicht unterschreiten darf.

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_{GL}} \Delta\psi(t) dt + \int_{t_{GL}}^{t_1} \Delta\psi(t) dt &= 0 \\ \int_{t_0}^{t_{GL}} \Delta\psi(t) dt &= - \int_{t_{GL}}^{t_1} \Delta\psi(t) dt \\ \Delta\psi(t) &= \frac{v(t)}{r(t)}; t_1 = \{\min(t : v(t) \leq 0, T)\}; r(t) = \{\max(r(t), r_{\min})\} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Da sich die Richtung des Lenkvorgangs nach dem Gegenlenkzeitpunkt  $t_{GL}$  umkehrt, ändert auch der Gierwinkel sein Vorzeichen. Diesem Umstand geschuldet verschwindet das negative Vorzeichen der rechten Seite in den sich anschließenden Rechnungen. Das Integral lässt sich für den Fall einer nicht beschleunigten Bewegung wie in Formel 5.13 gezeigt lösen. Der Gegenlenkzeitpunkt entspricht demnach der halben Manöverdauer, da weder der Fahrradius noch die Geschwindigkeit von der Zeit abhängen.

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{v_0}{r} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{v_0}{r} dt \\ t_{GL} &= \frac{t_0 + t_1}{2} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Im Falle einer beschleunigten Bewegung ergibt sich ein anderer Gegenlenkzeitpunkt. Formel 5.14 zeigt eine komplexere Berechnungsvorschrift für den Gegenlenkzeitpunkt, da sowohl der Fahrradius  $r$  als auch die Geschwindigkeit  $v$  von der Zeit abhängen. Diese Ergebnisse dieser Berechnung wurden bereits in [60] publiziert und verwendet.

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{v(t)}{r(t)} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{v(t)}{r(t)} dt \\ \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \cdot a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)^2} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \cdot a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)^2} dt \\ \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{1}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{1}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)} dt \\ \left[ \frac{1}{a_{\text{Längs}}} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \right]_{t_0}^{t_{GL}} &= \left[ \frac{1}{a_{\text{Längs}}} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \right]_{t_{GL}}^{t_1} \\ \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_{GL} + v_0) &= \frac{\ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_0 + v_0) + \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_1 + v_0)}{2} \\ t_{GL} &= \frac{\sqrt{a_{\text{Längs}} \cdot t_0 + v_0} \cdot \sqrt{a_{\text{Längs}} \cdot t_1 + v_0} - v_0}{a_{\text{Längs}}} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Die Berechnung weiterer Lösungen dieses Integrals wird durch den im Allgemeinen nicht differenzierbaren Verlauf des Fahrradius notwendig (Formel 5.12). Die hierzu durchgeführte Fallanalyse ist in Abbildung 5.7 gezeigt.

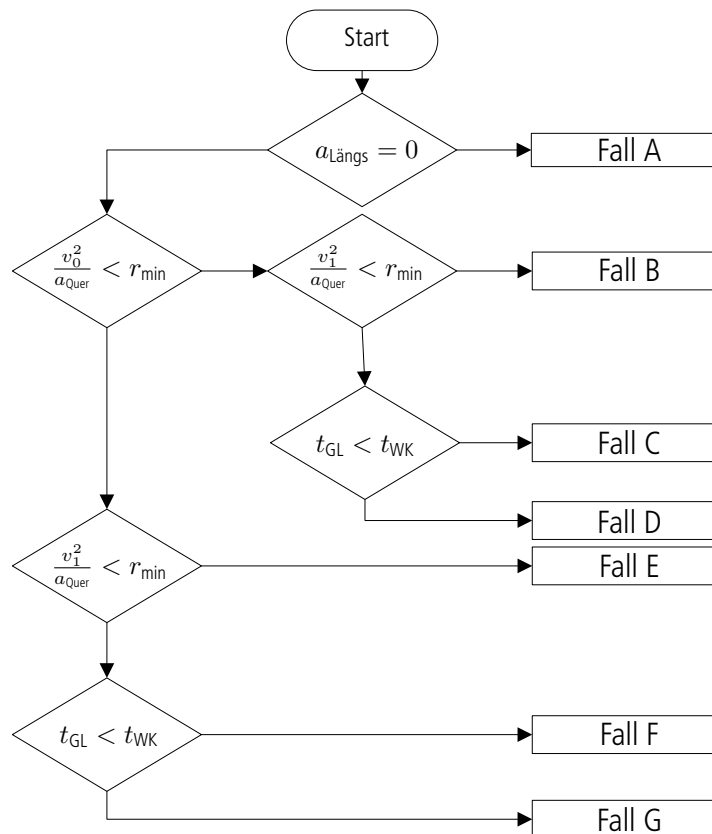


Abbildung 5.7: Unterschiedliche Fälle für die Berechnung des Gegenlenkzeitpunkts.

Tabelle 5.1 beschreibt die Lösungen für die Berechnung des Gegenlenkzeitpunkts  $t_{GL}$  der unterschiedlichen Fälle. Fall C liegt demnach vor, wenn der zu fahrende Radius infolge eines Bremsmanövers kleiner als der Wendekreis wird. In diesem Fall wird der Wendekreis ab dem Zeitpunkt der Unterschreitung (Zeitpunkt  $t_{WK}$ ) zur Berechnung der Modelltrajektorie verwendet. Fall D behandelt die Unterschreitung bereits vor dem Gegenlenken und bis zum Ende des Manövers. Bei Fall E liegt über die ganze Manöverdauer eine Unterschreitung vor. Fall F beschreibt das Beschleunigen aus kleiner Geschwindigkeit mit einer Unterschreitung vor dem Gegenlenkmanöver, während Fall G das Beschleunigen aus kleiner Geschwindigkeit mit einer Unterschreitung bis nach dem Gegenlenkmanöver berechenbar macht. Die Berechnungen zu den in Tabelle 5.1 dargestellten Lösungen sind im Anhang in Abschnitt A.3 zu finden.

Durch die Berechnungsvorschriften für den Gegenlenkzeitpunkt wird es möglich, eine Erreichbarkeitsmenge mit

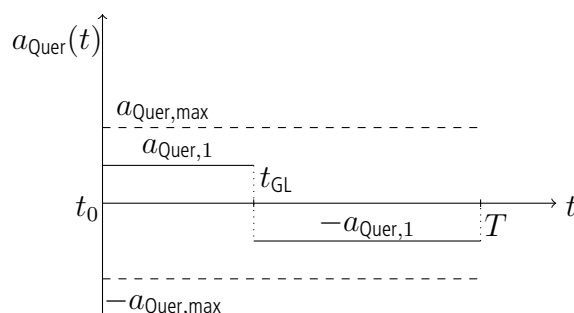


Abbildung 5.8: Sprung in  $a_{Quer}$  im Moment des Gegenlenkens ( $t_{GL}$ ) sowie zu Beginn und zu Ende des Manövers.

Tabelle 5.1: Berechnung des Gegenlenkzeitpunkts  $t_{GL}$  für unterschiedliche Fälle.

Fall	$t_{GL}$
A	$\frac{t_0 + t_1}{2}$
B	$\sqrt{t_0 + A} \cdot \sqrt{t_1 + A} - A$
C	$e^{\frac{a_{Längs}^2 \cdot (\frac{1}{2} \cdot (t_1^2 - t_{WK}^2) + A \cdot (t_1 - t_{WK}))}{2 \cdot a_{Quer} \cdot r_{min}}} \cdot \sqrt{t_{WK} + A} \cdot \sqrt{t_0 + A} - A$
D	$-A \pm \sqrt{A^2 + \frac{1}{2}(t_{WK}^2 + t_1^2) + A(t_{WK} + t_1) + B}$
E	$-A \pm \sqrt{A^2 + \frac{1}{2}(t_0^2 + t_1^2) + A(t_0 + t_1)}$
F	$e^{\frac{-a_{Längs}^2 \cdot (\frac{1}{2} \cdot (t_{WK}^2 - t_0^2) + A \cdot (t_{WK} - t_0))}{2 \cdot a_{Quer} \cdot r_{min}}} \cdot \sqrt{t_{WK} - A} \cdot \sqrt{t_1 - A} - A$
G	$-A \pm \sqrt{A^2 + \frac{1}{2}(t_{WK}^2 + t_0^2) + A(t_{WK} + t_0) + C}$
	$A = \frac{v_0}{a_{Längs}}$ $B = \frac{r_{min} \cdot a_{Quer}}{a_{Längs}^2} \cdot (\ln(a_{Längs} \cdot t_0 + v_0) - \ln(a_{Längs} \cdot t_{WK} + v_0))$ $C = \frac{r_{min} \cdot a_{Quer}}{a_{Längs}^2} \cdot (\ln(a_{Längs} \cdot t_1 + v_0) - \ln(a_{Längs} \cdot t_{WK} + v_0))$

einer geraden Fahrzeugausrichtung zu bestimmen. Diese soll, wie die Erreichbarkeitsmenge ohne gerade Fahrzeugausrichtung, die physikalischen Grenzen aufzeigen. Dazu wird die gerade ausgerichtete Erreichbarkeitsmenge mit einer konstanten Querbeschleunigung, einer konstanten Längsbeschleunigung und einem einzigen Gegenlenkmanöver berechnet. Die Querbeschleunigung ist im Zeitpunkt des Gegenlenkens, wie in Abbildung 5.8 gezeigt, als Sprung modelliert. Diese Annahmen stellen einen Kompromiss zwischen einer realen Erreichbarkeitsmenge und einer einfachen Modellierung dar. Neben den Modellannahmen hängt die Güte der Lösung von der Diskretisierung  $\Delta t$  ab.

Abbildung 5.9 zeigt eine Erreichbarkeitsmenge mit Modelltrajektorien, die parallel zum Anfangszustand enden. Die Erreichbarkeitsmenge ist bei gleichen Randbedingungen flächenmäßig kleiner geworden als in Abbildung 5.5, da wegen der geforderten Fahrzeugausrichtung weniger ZP in den Seitenbereichen anfahrbar sind. Die Erreichbarkeitsmenge ist als konvexe Hülle gepunktet dargestellt, während die Modelltrajektorien mit lenkender Bewegung durchgezogen gezeichnet sind.

Mit den zuvor beschriebenen Berechnungen ist es möglich, unterschiedliche Zielpunkte als Endpunkte der Modelltrajektorien zu berechnen. Diese Zielpunkte besitzen genau einen Zustand als Kombination aus Position, Fahrzeugausrichtung, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Position, Fahrzeugausrichtung und die Beschleunigungen sind durch die Modelltrajektorie bereits festgelegt. Es ist jedoch denkbar, den Pfad der Modelltrajektorie mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ohne Verletzung der Randbedingungen zurückzulegen. Somit ergeben sich durch denselben Pfad einer Modelltrajektorie unterschiedliche Zielpunkte mit unterschiedli-

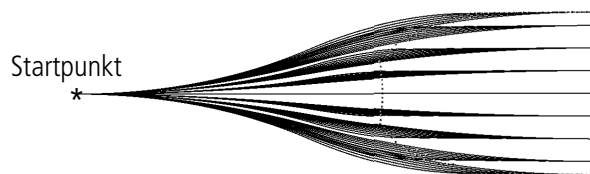


Abbildung 5.9: Form einer Erreichbarkeitsmenge (gepunktet) und Modelltrajektorien mit lenkender Bewegung, die parallel zum Anfangszustand enden (durchgezogen) von einem Startpunkt (links) zu vielen Endzuständen (rechts).

chen Geschwindigkeitsprofilen. Diese Variation der Geschwindigkeitsprofile ist in Abbildung 5.10 gezeigt. Dabei werden für die Geschwindigkeitsprofile die Randbedingungen des Startzustands, der zurückgelegten Strecke, der Manöverdauer und der Beschränkungen der Beschleunigungen berücksichtigt. Es ergeben sich mehrere Zielpunkte, die bis auf die Geschwindigkeit im Zielpunkt den gleichen Zustand aufweisen.

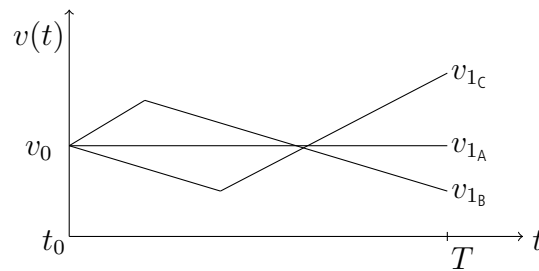


Abbildung 5.10: Variation des Geschwindigkeitsprofils auf einem Pfad.

**Zusammengefasst:** Die Zielpunkterzeugung errechnet physikalisch erreichbare Punkte von Fahrzeugen innerhalb eines bestimmten Zeithorizonts, die eine gerade Fahrzeugausrichtung aufweisen. Sie berücksichtigt physikalische Randbedingungen und berechnet unterschiedliche Endgeschwindigkeiten für sonst gleiche Zielpunkte.

## 5.2.2 Risikoanalyse Zielpunkte

Die Risikoanalyse der Zielpunkte hat die Aufgabe, sichere von unsicheren Zielpunkten zu unterscheiden. Dazu ist zunächst jeweils zu definieren, was sicher bzw. unsicher im Zusammenhang mit Zielpunkten bedeutet: Es wird von einem sicheren Zielpunkt oder Endzustand gesprochen, wenn sich das Fahrzeug in diesem Zustand auf der Straße befindet, keine dynamischen oder statischen Hindernisse berührt und die StVO eingehalten wird. Darüber hinaus wird für eine weitere Zeitdauer, den Betrachtungshorizont  $T_{\text{Betracht}}$ , die Einhaltung der zuvor beschriebenen Beschränkungen überprüft. Dazu wird eine Trajektorie einer gleichförmigen Bewegung erzeugt, welche die gleiche Fahrzeugausrichtung und Geschwindigkeit wie im Zielpunkt aufweist. Der Zeitbereich des Betrachtungshorizonts soll es dem Fahrer ermöglichen, sich wieder auf die Fahraufgabe vorzubereiten und das Fahrzeug nach dem automatisch durchgeführten Manöver zu übernehmen. Hält der Zielpunkt der Überprüfung stand, so wird er als sicherer Zielpunkt gespeichert. Unsicherer Zielpunkte werden hingegen verworfen.

Der Ablauf der Risikoanalyse für Zielpunkte sieht vor, dass zuerst alle statischen und nicht beeinflussbaren Objekte auf Kollisionen mit dem Zielpunkt überprüft werden. Alle kollisionsbehafteten Zielpunkte werden verworfen. Anschließend werden alle übriggebliebenen Zielpunkte der kooperativen Teilnehmer miteinander verglichen. Die Kombinationen, die nach dieser Überprüfung als sicher eingestuft werden, beinhalten Zielpunkte, die sowohl aus einer egozentrierten als auch einer gemeinschaftlichen Betrachtung sicher sind.

Da es sich bei Zielpunkten um diskrete Zustände handelt, kann für die Risikoanalyse ein hierfür optimiertes Verfahren eingesetzt werden. Das Separating Axis Theorem (SAT) [66] eignet sich, um Überschneidungen zwischen zwei konvexen Objekten zu detektieren. Dies geschieht indirekt durch den Existenznachweis einer separierenden Hyperebene. Ist mindestens eine der orthogonalen Projektionen zweier Objekte auf eine senkrecht zu der Hyperebene stehende Achse überschneidungsfrei, so kann die Kollisionsfreiheit durch diese separierende Achse nachgewiesen werden. Damit eignet sich das Verfahren direkt für die Überprüfung der sicheren Zielpunkte.

Abbildung 5.11 zeigt ein Beispiel zur Kollisionsprüfung mithilfe des SAT-Algorithmus, welcher über den Nachweis einer überschneidungsfreien Achse Kollisionsfreiheit zwischen zwei Objekten detektiert. Im Fall von zweidimensionalen, rechteckigen Objekten existieren vier zu prüfende Achsen. Abbildung 5.11a zeigt einen kollisionsfreien Zustand, der überprüft werden soll. Nachfolgend werden nun Projektionsachsen ausgehend vom weißen Fahrzeug (Abbildung 5.11b) erzeugt. Auf diese wird die Geometrie des anderen Fahrzeugs projiziert. Die roten

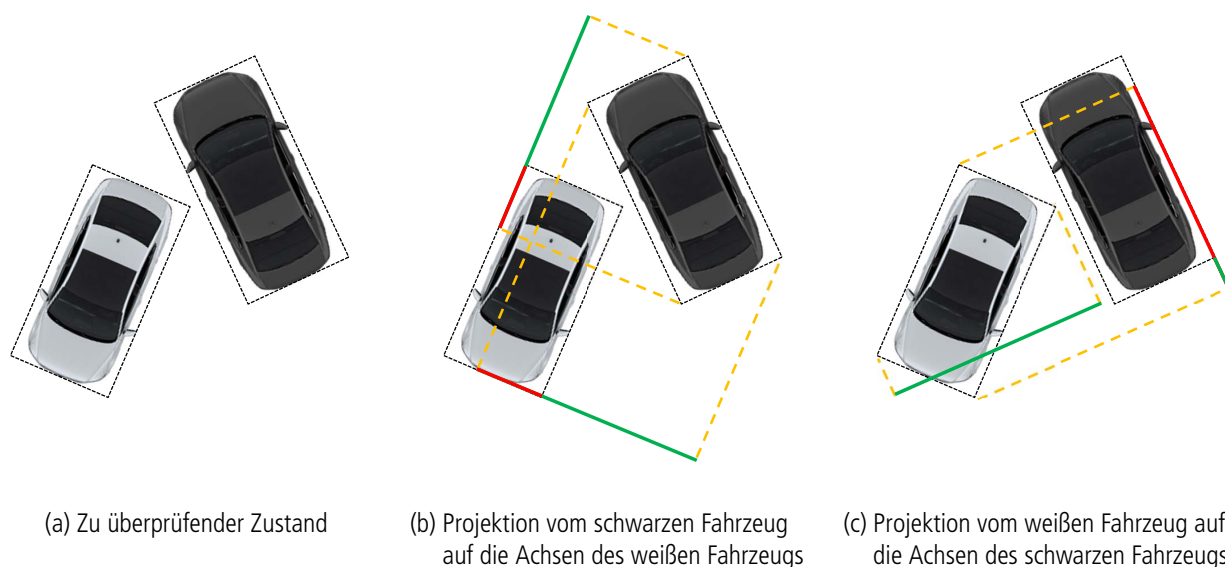


Abbildung 5.11: Funktionsweise des SAT [58].

Teilabschnitte deuten dabei Überschneidungen, die grünen überschneidungsfreie Bereiche an. Da sich beide Projektionen überschneiden, scheint der Zustand aus Sicht des ersten Fahrzeugs kollisionsbehaftet. Um eine Kollision endgültig festzustellen oder auszuschließen, müssen auch die zwei Projektionsachsen vom schwarzen Fahrzeug überprüft werden. Abbildung 5.11c zeigt, dass eine der beiden Projektionen gänzlich überschneidungsfrei ist. Die Kollisionsfreiheit ist mithilfe einer überschneidungsfreien Projektion also nachgewiesen. Durch diese Art der Überprüfung eignet sich der SAT-Algorithmus besonders, um Kollisionsfreiheit zu detektieren. Im Optimalfall reicht die Überprüfung einer Projektionsachse aus.

### 5.2.3 Trajektorienerzeugung

Zu allen ermittelten sicheren Zielpunkten werden verschiedenartige Trajektorien im Hinblick auf räumliche und zeitliche Verläufe erzeugt. Eine Trajektorie beschreibt den Zustandsübergang von einem Ausgangszustand A in einen Endzustand B. Angewandt auf die kooperative Manöverplanung bedeutet dies, dass Trajektorien von einem Startpunkt zu einem sicheren Zielpunkt führen.

Die Idee der Trajektorienerzeugung lässt sich auf die Erzeugung möglichst vieler unterschiedlicher Trajektorien vom Startpunkt zum Zielpunkt zusammenfassen. Diese Vielzahl von Trajektorien erhöht die Chance, dass mindestens eine Trajektorienkombination der Teilnehmer kollisionsfrei ist und somit eine Konfliktlösung darstellt. Bekannte Methoden zur Generierung von Trajektorien umfassen gerichtete Graphen, elastische Band-Methoden und Potenzialfeld-Methoden (siehe beispielsweise [164]). Da diese Methoden zum Zwecke der Erzeugung einer einzigen besten Trajektorie entwickelt wurden, eignen sie sich nicht zur Generierung möglichst vieler und unterschiedlicher Trajektorien. Daher ist ein neuartiger Trajektoriengenerator notwendig, der physikalische, rechtliche und infrastrukturelle Bedingungen von Straßenfahrzeugen berücksichtigt und gleichzeitig eine große Anzahl von unterschiedlichen Trajektorien erzeugt. Der entwickelte Trajektoriengenerator ist bereits in [60] erschienen. Er erstellt Trajektorien in drei Schritten. Zunächst wird ein Gitter aus Stützpunkten auf der Straßenfläche erzeugt. Anschließend werden der Startpunkt und der Zielpunkt durch eine wählbare Anzahl von Stützpunkten mittels Pfaden verbunden. Abschließend werden die Pfade durch das Anwenden eines Geschwindigkeitsprofils zu Trajektorien umgewandelt, die das Ergebnis des Prozesses darstellen.

### Gittererzeugung

Als erster von drei Schritten hat die Gittererzeugung die Aufgabe, die Straße mit einer gewünschten Anzahl von Gitterpunkten zu belegen. Diese fungieren als Stützstellen für eine systematische Variation an Pfaden.

Dazu wird zunächst ein rechteckiges Gitter erzeugt, welches mit einer wählbaren Anzahl von Stützpunkten in Längs- und Querrichtung versehen werden kann. Die minimale Anzahl beträgt in Längsrichtung einen und in Querrichtung vier Punkte. Die Mindestanzahl von vier ergibt sich aus jeweils einem Punkt auf Höhe der Querablage des Start- bzw. Zielpunkts und je einem Punkt nahe des linken bzw. rechten Fahrbahnrandes. Durch die Festsetzung dieser vier Punkte wird garantiert, dass einerseits die gesamte Straßenbreite ausgenutzt werden kann und andererseits Pfade vom Start- und Zielpunkt zu den Gitterpunkten erzeugt werden können, die kein Lenkmanöver beinhalten. Weitere Gitterpunkte werden so aufgeteilt, dass die Abstände zwischen den bestehenden vier Gitterpunkten minimiert werden. Ab dem fünften Gitterpunkt in Querrichtung werden die Gitterpunkte derart den Zwischenräumen zugeordnet, dass sich die Abstände im Gitter verringern. Dabei halbiert der erste zugeordnete Punkt den Abstand zwischen den schon vorhandenen Punkten. Der zweite zugeordnete Punkt würde zu einer Drittelung des Abstands führen, da nun die beiden Punkte die Abstände minimieren. Die Gitterpunkte in Längsrichtung werden nach einem ähnlichen Muster verteilt. Die Anzahl der Punkte wird gleichmäßig auf die zu überwindende Distanz zwischen Start- und Zielpunkt verteilt. Die Zuordnungsroutine stellt somit sicher, dass die Punkte immer ein homogen verteiltes Stützpunktraster erzeugen.

Abbildung 5.12 zeigt ein Beispiel zur Aufbereitung der Gitterpunkte in drei Schritten. Dabei wird gezeigt, dass nicht jeder Gitterpunkt, der erzeugt wird, tatsächlich zur Erzeugung von Pfaden geeignet ist und plausibilisiert werden muss. Abbildung 5.12a illustriert ein Gitter mit sechs Punkten in Querrichtung und vier Punkten in Längsrichtung auf einer Straße. Das Gitter wird nun auf Kollisionen mit statischen Hindernissen untersucht. Liegt

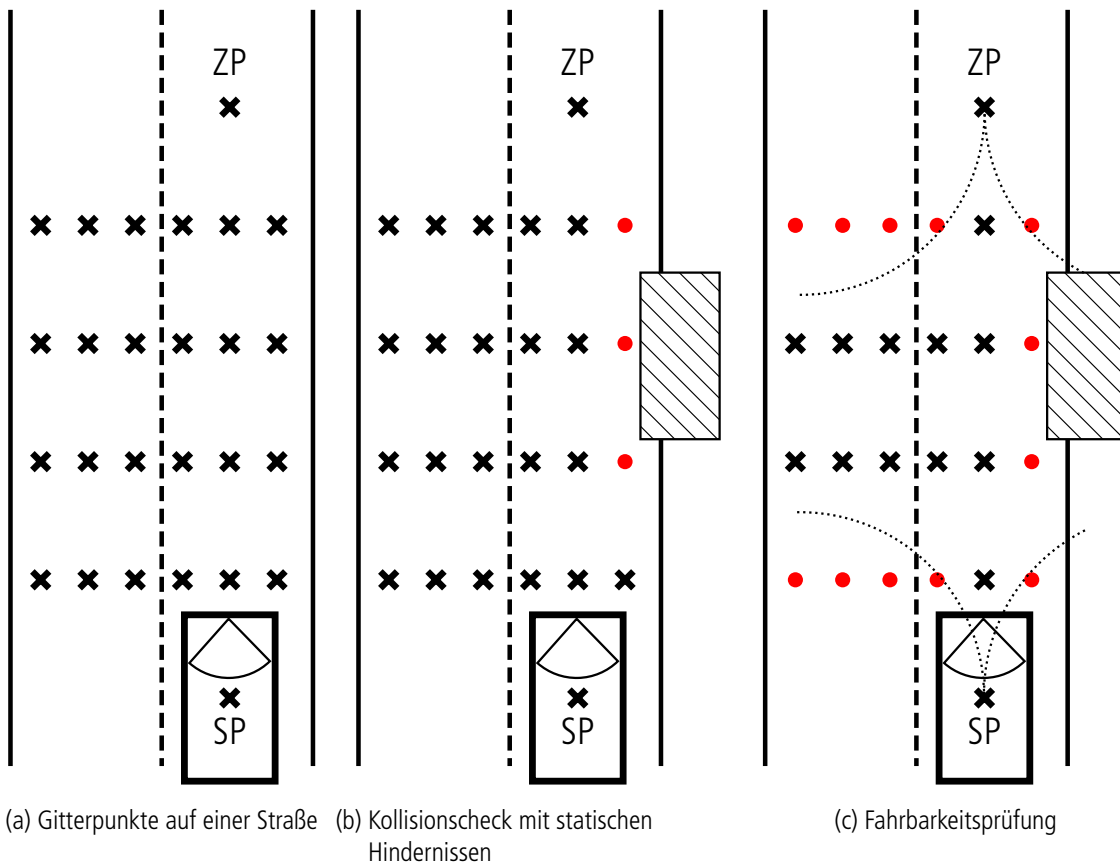


Abbildung 5.12: Gitter bestehend aus anfahrbaren und mit statischen Objekten kollisionsfreien Stützpunkten.



ein Gitterpunkt in oder in unmittelbarer Nähe zu einem statischen Hindernis, so wird dieser Gitterpunkt aus dem Gitter entfernt (Abbildung 5.12b). Weiterhin wird überprüft, ob der Pfad zwischen den Gitterpunkten ohne Unterschreitung des Wendekreises fahrbar ist oder nicht (Abbildung 5.12c und Formel 5.15). Für Gitterpunkte, die direkt mit dem Startpunkt verbunden werden sollen, wird als Approximation mit der Startgeschwindigkeit gerechnet. Dabei wird analysiert, ob der Gitterpunkt vom Startpunkt erreicht werden kann. Für Gitterpunkte, die mit dem Zielpunkt verbunden sind, wird dieselbe Überprüfung mit der Endgeschwindigkeit durchgeführt. Dabei wird überprüft, ob der Zielpunkt vom entsprechenden Gitterpunkt aus erreichbar ist. Die konstante Start- bzw. Endgeschwindigkeit wird genutzt, da eine Veränderung der Längsgeschwindigkeit eine Längsbeschleunigung erfordern würde, die aufgrund der bereits maximal in der Berechnung verwendeten Querschleunigung fahrdynamisch nicht möglich ist.

$$r_{\min} \leq \frac{v^2}{a_{\text{Quer,max}} \cdot \mu} \quad (5.15)$$

Schlägt die Überprüfung fehl, ist also der zu fahrende Fahrradius kleiner als der minimal mögliche, so wird der Gitterpunkt verworfen. Das Ergebnis ist ein Gitter bestehend aus einer gewünschten Anzahl von Gitterpunkten in Längs- und Querrichtung, die eine Variation von Pfaden erlaubt. Dabei berücksichtigt das Gitter bereits rudimentäre physikalische Randbedingungen mittels Abschätzungen hinsichtlich der Fahrbarkeit von Kurvenradien und Kollisionen mit statischen Hindernissen.

### Pfaderzeugung

Die Pfaderzeugung erstellt eine Vielzahl von Pfaden, die den Startpunkt mit dem Zielpunkt über eine variabel einstellbare Anzahl von Stützpunkten verbinden. Aus der Anzahl der genutzten Stützpunkte kann somit direkt die *Anzahl der Teilmanöver* errechnet werden. Diese sind immer um eins höher als die genutzten Stützpunkte. Eine direkte Verbindung zwischen Start- und Zielpunkt nutzt keinen Stützpunkt und ist entsprechend ein Manöver mit einem Teilmanöver. Wenn das Gitter genutzt wird, werden die Gitterpunkte mittels Polynomen miteinander verbunden. Polynome eignen sich, da sich Geradeausfahrten ebenfalls mit ihnen darstellen lassen. Sigmoiden ermöglichen dies beispielsweise nicht. Damit sich die Pfade aneinanderreihen lassen, müssen die Fahrzeugausrichtungen, Quergeschwindigkeiten und -beschleunigungen im Endpunkt des ersten Teilstücks mit dem Startpunkt des zweiten Teilstücks übereinstimmen. Außerdem sollen die erzeugten Pfade nicht springen, weswegen die Querpositionen, die Quergeschwindigkeiten und die Querschleunigungen stetig sein müssen. Dementsprechend werden die folgenden Bedingungen formuliert:

- Der Startpunkt eines (Teil-)Pfads ist bekannt.
- Der Endpunkt eines (Teil-)Pfads ist bekannt.
- Die Quergeschwindigkeit im Start- und Endpunkt ist null.
- Die Querschleunigung im Start- und Endpunkt ist null.
- Die Verläufe der Querposition, der Quergeschwindigkeit und der Querschleunigung sind stetig.

Es ist zu beachten, dass an dieser Stelle Anforderungen an den Pfad und nicht an die Trajektorie gestellt werden. Die finalen Quergeschwindigkeits- und Querschleunigungsverläufe werden demnach erst im nächsten Schritt, der Vollendung der Trajektorie, berechenbar. Durch das dort vorgenommene Hinzufügen von Geschwindigkeitsprofilen ändern sich die Nullstellen des Pfads jedoch nicht. Daher wird in diesem Abschnitt vereinfacht von Quergeschwindigkeits- und Querschleunigungsverläufen gesprochen.

Die einfachste Repräsentation für sechs Bedingungen ist ein Polynom fünfter Ordnung. Polynome fünfter Ordnung wurden bereits in anderen Arbeiten zur Erzeugung von Querbewegungen genutzt ([248, 306]) und sind

mathematisch leicht beschreibbar. Die als Bewegungsprimitive bezeichneten Teilpfade aus Formel 5.16 unterliegen also den folgenden Bedingungen:

$$y(x) = c_5 x^5 + c_4 x^4 + c_3 x^3 + c_2 x^2 + c_1 x + c_0 \quad (5.16)$$

$$y(x = x_0) = y_0 \wedge y(x = x_1) = y_1$$

$$y'(x = x_0) = y'(x = x_1) = 0$$

$$y''(x = x_0) = y''(x = x_1) = 0.$$

Für die Berechnung der Koeffizienten  $\{c_0, c_1, \dots, c_5\}$  wird ein Gleichungssystem aus den Ableitungen von Formel 5.16 gebildet, welches die Einhaltung der formulierten Anforderungen ermöglicht.

$$y(x) = c_5 (x - x_0)^5 + c_4 (x - x_0)^4 + c_3 (x - x_0)^3 + c_2 (x - x_0)^2 + c_1 (x - x_0) + c_0 \quad (5.17)$$

$$y'(x) = 5 \cdot c_5 (x - x_0)^4 + 4 \cdot c_4 (x - x_0)^3 + 3 \cdot c_3 (x - x_0)^2 + 2 \cdot c_2 (x - x_0) + c_1 \quad (5.18)$$

$$y''(x) = 20 \cdot c_5 (x - x_0)^3 + 12 \cdot c_4 (x - x_0)^2 + 6 \cdot c_3 (x - x_0) + 2 \cdot c_2 \quad (5.19)$$

Durch die Anfangsbedingungen aus Formel 5.16 ergeben sich die Koeffizienten zu  $c_0 = y_0$  und  $c_1 = c_2 = 0$ . Die restlichen Koeffizienten  $\{c_3, c_4, c_5\}$  müssen mittels eines linearen Gleichungssystems gelöst werden.

$$\begin{bmatrix} (x_1 - x_0)^5 & (x_1 - x_0)^4 & (x_1 - x_0)^3 \\ 5(x_1 - x_0)^4 & 4(x_1 - x_0)^3 & 3(x_1 - x_0)^2 \\ 20(x_1 - x_0)^3 & 12(x_1 - x_0)^2 & 6(x_1 - x_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_5 \\ c_4 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - y_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Die Lösung des Gleichungssystems lautet:

$$c_5 = 6 \cdot \frac{y_1 - y_0}{(x_1 - x_0)^5} \quad c_4 = -15 \cdot \frac{y_1 - y_0}{(x_1 - x_0)^4} \quad c_3 = 10 \cdot \frac{y_1 - y_0}{(x_1 - x_0)^3}$$

Mit dem Start- bzw. Zielpunkt eines (Teil-)Pfads  $\{x_0, y_0\}; \{x_1, y_1\}$  ist die Pfaderzeugung vollständig bestimmt und ermöglicht eine variable Erzeugung von Pfaden mittels Polynomen fünfter Ordnung.

Abbildung 5.13 zeigt den Entstehungsprozess von Pfaden. Dabei wird in einem ersten Schritt der Startpunkt mit jedem Gitterpunkt und direkt mit dem Zielpunkt verbunden. Abbildung 5.13a zeigt den Start- und Zielpunkt in Form von dicken Punkten, die Gitterpunkte als Kreuze und die möglichen Pfade als gestrichelte Linien. In Abbildung 5.13b werden zuvor gestrichelte Pfade als durchgezogene Linien dargestellt, wenn sie die Überprüfung der Erreichbarkeit mittels Analyse der maximal möglichen Querbeschleunigung erfolgreich bestanden haben. Die Überprüfung wird, anstatt mit der maximalen Krümmung und der zugehörigen Geschwindigkeit, vereinfacht mit der kleinsten Geschwindigkeit und der zweiten Ableitung des Pfads berechnet. Die Geschwindigkeit steht zu diesem Zeitpunkt der Berechnung nicht fest, hat jedoch einen Einfluss auf das Ergebnis. Mit der kleinsten Geschwindigkeit wird eine hinsichtlich der Aussortierung konservative Annahme getroffen, dass heißt, es bleiben möglicherweise nicht fahrbare Pfade enthalten. Da es sich in diesem Stadium um eine Abschätzung der Fahrbarkeit handelt, wird auf die Verwendung der exakteren und rechenintensiveren Formel der Krümmung zugunsten der zweiten Ableitung des Pfads verzichtet. Die so berechneten Werte sorgen für eine Vorauswahl, an die sich nach Vollendung der Trajektorie eine genaue Überprüfung der Randbedingungen anschließt. Die Vorauswahl wird mit Formel 5.21 durchgeführt.

$$a_{\text{Quer}}(x) \approx v^2 \cdot y''(x) \quad (5.21)$$

$$v = \min(v_0, v_1)$$

Zur Bestimmung der kritischen Stelle  $x$  in  $y''(x)$  wird eine Extremwertanalyse durchgeführt. Die Extremwerte, ob Maximum oder Minimum, sind vom Betrag her aufgrund der Symmetrie gleich groß. Für  $y'''(x) = 0$  ergibt

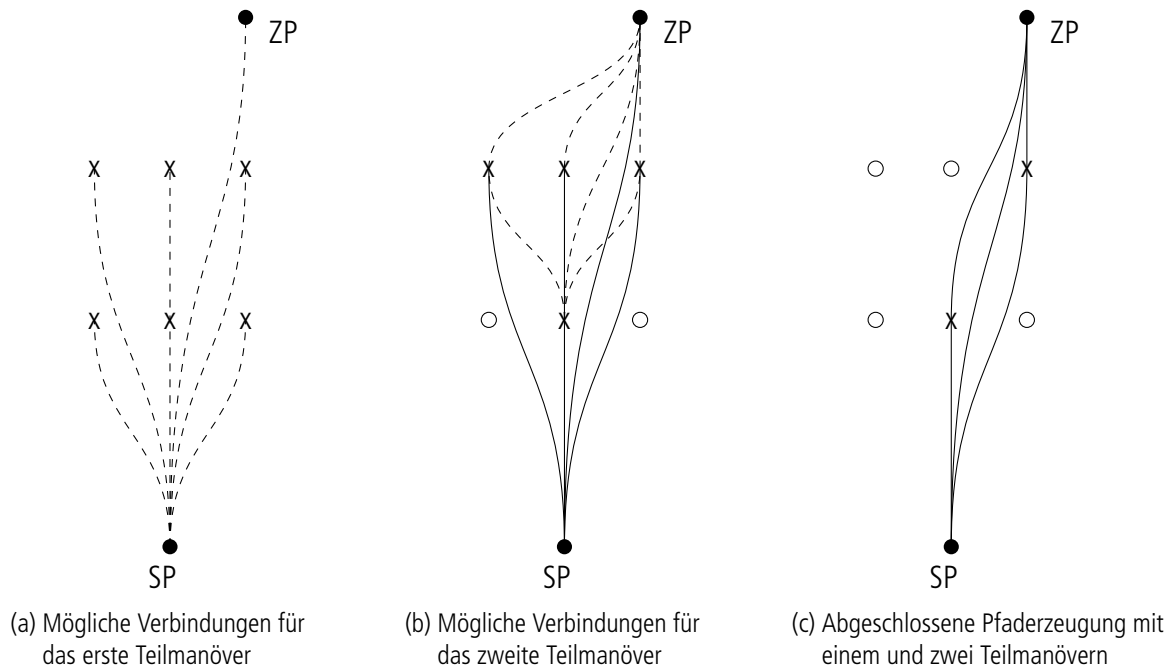


Abbildung 5.13: Pfaderzeugungsprozess in Anlehnung an [60].

sich für die Stellen  $x_{E1,E2}$  der Ausdruck aus Formel 5.22.

$$x_{E1,E2} = x_0 - \frac{6 \cdot c_4}{30 \cdot c_5} \pm \sqrt{\left(\frac{6 \cdot c_4}{30 \cdot c_5}\right)^2 - \frac{3 \cdot c_3}{30 \cdot c_5}} \quad (5.22)$$

Schließlich kann der Pfad an der Stelle des Maximalwerts der zweiten Ableitung mit einer gewählten Geschwindigkeit approximiert werden. Diese erste Überprüfung reduziert die Pfade auf diejenigen, die physikalisch potenziell fahrbar sind. In Abbildung 5.13b werden endgültig nicht anfahrbare Gitterpunkte als Kreise dargestellt. Sie kommen nicht mehr als Stützstellen in Frage.

Für alle anfahrbaren Gitterpunkte kommen weitere Verbindungsstücke hinzu, die die Gitterpunkte mit dem Zielpunkt und anderen, weiter in Richtung des Zielpunkts liegenden Gitterpunkten, verbinden. Diese werden nach dem gleichen Schema auf ihre Tauglichkeit hin überprüft. Final ergibt sich eine Schar aus mehreren Pfaden, die in diesem Beispiel den Startpunkt mit dem Zielpunkt mittels eines direkten und zwei zweiteiligen Manövers verbinden. Abbildung 5.13c zeigt den Pfadfächer, wobei jeder Teilpfad als ein Tupel aus  $[x_0, y_0, x_1, y_1]$  abgelegt wird. Somit besteht ein einteiliger Pfad aus einem Tupel,  $n$ -teilige Pfade entsprechend aus  $n$  Tupeln.

Der Pfaderzeugungsprozess kann in einem Gitter derart limitiert werden, dass nur eine gewünschte Anzahl von Teilmanövern erzeugt wird. Dazu werden bei Erreichen des vorletzten Teilmanövers nur noch Pfade von Gitterpunkten direkt zum Zielpunkt erzeugt. Die übrigen Kombinationen von Pfaden, die Gitterpunkte verbinden, werden ausgelassen. Weiterhin werden alle geraden Pfade, die mehr als ein konsekutives gerades Stück aufweisen, verworfen. Das gerade Stück wird somit immer als ein Stück aufgefasst und liegt nicht redundant als ein direktes und ein aus zwei oder mehr Teilen bestehendes Stück vor.

### Vollendung der Trajektorie

Mit der Vollendung der Trajektorie wird der Prozess beschrieben, der aus den erzeugten Pfaden Trajektorien erstellt. Dies geschieht durch das Aufprägen von Geschwindigkeitsprofilen auf die Pfade, also das Erweitern der geometrischen Pfade um eine zeitliche Dimension. Die Geschwindigkeitsprofile unterliegen Bedingungen:

So sind die Start- bzw. Endgeschwindigkeiten durch den Start- bzw. Zielpunkt festgelegt. Weiterhin muss der komplette Pfad  $L$  mit Erreichen der Manöverdauer  $T$  zurückgelegt worden sein. Die Randbedingungen der Beschleunigung sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Im betrachteten Intervall wird von einer konstanten Beschleunigung ausgegangen, wie sie in Abbildung 5.14a gezeigt ist. Mit dem Umschaltzeitpunkt der Längsbeschleunigung  $t_U$  wird ein Freiheitsgrad eingeführt, der die sonst überbestimmte Berechnung ermöglicht, da in derselben Manöverdauer  $T$  unterschiedliche Pfadlängen  $L$  zurückgelegt werden sollen, ohne dass sich die Anfangs- oder Endgeschwindigkeiten ändern. Dieser Umschaltzeitpunkt befindet sich bei einem einteiligen Manöver auf der Mitte des Manövers, bei der Verwendung von Gitterpunkten liegt er auf einem dieser. Bei der Verwendung von mehr als einem Gitterpunkt können aus einem Pfad mittels Variation der Umschaltzeitpunkte unterschiedliche Trajektorien erzeugt werden. Die Querbewegung ist ein Polynom dritter Ordnung und in Abbildung 5.14b gezeigt.

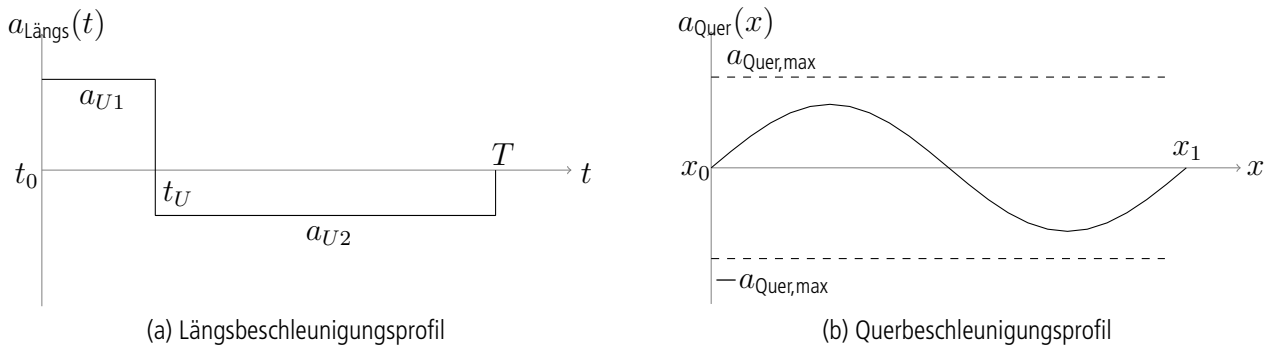


Abbildung 5.14: Längs- und Querbewegung auf einem Pfad.

Die Randbedingungen lassen sich zu den folgenden zusammenfassen:

$$v(t_0) = v_0 \wedge v(T) = v_1$$

$$s(t_0) = s_0 \wedge s(t_U) = L\left(x_{GP} \vee \frac{x_1}{2}\right) = s_U \wedge s(T) = L(x_1) = s_1$$

Die Länge des Pfades  $L$  kann, ausgehend von Formel 5.23, mithilfe von Formel 5.18, durch Formel 5.24 berechnet werden.

$$L(x) = \int_0^x \sqrt{1 + (y'(x))^2} dx \quad (5.23)$$

$$L(x) = \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + (5c_5(x - x_0)^4 + 4c_4(x - x_0)^3 + 3c_3(x - x_0)^2 + 2c_2(x - x_0) + c_1)^2} dx \quad (5.24)$$

Da für Gleichung 5.24 keine analytische Lösung bekannt ist, wird das Integral mit der Trapezregel numerisch gelöst.

Zur Berechnung der als konstant angenommenen Längsbeschleunigungen  $a_{U1}$  und  $a_{U2}$  werden die Gleichungen des Weg-Zeit-Gesetzes herangezogen. Für  $s_0 = t_0 = 0$  ergibt sich nach Auflösen der vier Gleichungen (komplette Rechnung siehe Anhang Abschnitt A.4) von  $v_U, s_U, v_1$  und  $s_1$  der Umschaltzeitpunkt  $t_U$  zu:

$$t_U = \begin{cases} -\frac{\frac{T}{2} \cdot (v_1 - v_0) - s_1}{v_0 - v_1} + \sqrt{\left(\frac{\frac{T}{2} \cdot (v_1 - v_0) - s_1}{v_0 - v_1}\right)^2 - \frac{2 \cdot s_U \cdot T}{v_0 - v_1}} & \text{falls } v_0 < v_1 \\ \frac{s_U \cdot T}{s_1} & \text{falls } v_0 = v_1 \\ -\frac{\frac{T}{2} \cdot (v_1 - v_0) - s_1}{v_0 - v_1} - \sqrt{\left(\frac{\frac{T}{2} \cdot (v_1 - v_0) - s_1}{v_0 - v_1}\right)^2 - \frac{2 \cdot s_U \cdot T}{v_0 - v_1}} & \text{sonst,} \end{cases} \quad (5.25)$$

Die Beschleunigungen lassen sich entsprechend berechnen (komplette Rechnung siehe Anhang Abschnitt A.5):

$$a_{U1} = \frac{2 \cdot s_U - 2 \cdot v_0 \cdot t_U}{t_U^2} \quad (5.26)$$

$$a_{U2} = \frac{v_0 + v_1 - \frac{2 \cdot s_U}{t_U}}{T - t_U} \quad (5.27)$$

Für den so berechneten Umschaltzeitpunkt und die beiden Beschleunigungswerte ist ein Beispiel in Abbildung 5.14a gezeigt. Abschließend ist zur Gewährleistung der Fahrbarkeit die Überprüfung der Bedingung des Kammschen Reibungskreises nach Formel 5.8 durchzuführen. Die dafür notwendigen Längs- und Querschleunigungen sind jedoch voneinander abhängig: Die Wahl einer bestimmten Längsbeschleunigung zieht über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf dem Pfad eine Querschleunigung nach sich. Durch die Festlegung des Umschaltzeitpunkts auf einen Gitterpunkt wird dieser Zirkelschluss aufgelöst, da dann der Längsbeschleunigungswert als Maximalwert auf einem definierten Intervall gilt und sich die maximale Querschleunigung auf diesem Intervall nach 5.21 und 5.22 berechnen lässt.

Beispielhaft ergibt sich ein in Abbildung 5.14b gezeigter Verlauf. Sofern die Längs- und Querschleunigung der Bedingung des Kammschen Reibungskreises nicht verletzen, wird das Tupel des Pfads um den Umschaltzeitpunkt  $t_U$  und die beiden Längsbeschleunigungen  $a_{U1}$  und  $a_{U2}$  erweitert.

**Zusammenfassung:** Die Trajektorienerzeugung generiert eine Vielzahl von geometrisch unterschiedlichen Pfaden mit Polynomen fünfter Ordnung, die anschließend mit zum Teil unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen zu Trajektorien werden. Diese Trajektorien berücksichtigen die maximal möglichen Längs- und Querschleunigungen und unterliegen der Bedingung des Kammschen Reibungskreises. Jeder Teilpfad einer Trajektorie wird als Tupel bestehend aus  $[x_0, y_0, x_1, y_1]$  gespeichert, während das Geschwindigkeitsprofil für die gesamte Trajektorie als ein Tupel aus  $[t_U, a_{U1}, a_{U2}]$  besteht. Die gesamte Trajektorie besteht somit aus einem Tupel jedes Teilpfads und des Geschwindigkeitsprofils.

### 5.2.4 Risikoanalyse Trajektorien

Die Risikoanalyse der Trajektorien hat zur Aufgabe, Kollisionen zwischen Teilnehmern zu identifizieren und zu verhindern. Sie klassifiziert Trajektorien als kollisionsbehaftet, sofern sie statische Objekte oder nicht beeinflussbare dynamische Objekte berühren. Sich schneidende Trajektorienpaare unterschiedlicher kooperativer Teilnehmer werden in dieser Kombination als kollidierend markiert, die jeweiligen Trajektorien aber nicht verworfen. Dies ist der Fall, da die betreffenden Trajektorien in anderen Kombinationen durchaus kollisionsfrei sein können und sonst nicht weiter betrachtet werden würden. Erst wenn eine Trajektorie mit allen Trajektorien mindestens eines anderen Teilnehmers kollisionsbehaftet ist, wird diese ebenfalls verworfen. Bei der Kollisionsüberprüfung werden Sicherheitsabstände in Längs- und Querrichtung  $s_{\text{Längs}}$  bzw.  $s_{\text{Quer}}$  berücksichtigt. Eine Trajektorienkombination gilt dann als sicher, wenn alle zugehörigen Trajektorien mit allen darin enthaltenen Zuständen eines jeden Zeitschritts gegeneinander verglichen und als kollisionsfrei identifiziert wurden.

Zur Überprüfung der Trajektorien kommt, wie auch bei der Risikoanalyse der Zielpunkte, der SAT-Algorithmus zum Einsatz. Der Prozess zur Überprüfung soll an einem Beispiel der Kollisionsüberprüfung von zwei Trajektorien erläutert werden. Die Kollisionsüberprüfung arbeitet in vier Schritten. Zuerst werden die relevanten zwei Trajektorien ausgewählt. Dann werden die Trajektorien in Samples unterteilt, die in einem zeitlichen Abstand vorliegen. Für jedes Sample wird nun ein orientierter Rahmen (Oriented Bounding Box (OBB)) mit den Abmaßen und der Orientierung der Fahrzeuge erzeugt. Schließlich prüft der SAT-Algorithmus für jedes Sample der beiden Trajektorien, ob eine Kollision vorliegt oder nicht. Liegt keine Kollision vor, wird diese Trajektorienkombination als kollisionsfrei abgespeichert.

Das Ergebnis der Risikoanalyse der Trajektorien sind kollisionsfreie Pläne, die aus sicheren Trajektorien und sicheren Zielpunkten bzw. Endzuständen für jeden Teilnehmer bestehen.

## 5.3 Modul II - Planbewertung

Die Planbewertung ermöglicht eine Priorisierung der Pläne, die durch die Planerzeugung berechnet wurden. Dabei wurde bereits sichergestellt, dass Pläne immer kollisionsfrei sind. Trotzdem können, je nach Anwendungsfall und Parametrierung, zwischen einigen hundert und mehreren hundert Millionen Plänen vorliegen. Die Planbewertung soll nun, transparent für jeden Teilnehmer, aus diesen Plänen das Optimum ermitteln. Dazu wird, entsprechend der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Definition von kooperativem Verhalten, ein Kostenfunktional aufgestellt, damit die Kosten für die Teilnehmer operationalisiert werden können. Die Gesamtkosten setzen sich aus Primärkosten der Teilnehmer zusammen, die in Kosten umgerechnet und aufsummiert werden. Der Plan mit den geringsten Gesamtkosten stellt den favorisierten Plan dar.

Zunächst werden mögliche Bewertungsgrößen in Abschnitt 5.3.1 beschrieben. Es schließt sich die Definition der Kostenfunktionen in Abschnitt 5.3.2 an, die durch eine auf Fuzzy-Mengen basierender Logik Primärkosten ausgeben. Schließlich wird in Abschnitt 5.3.3 beschrieben, wie die unterschiedlichen Primärkosten in den finalen Kosten zusammengefasst werden.

### 5.3.1 Bewertungskriterien

Die Bewertungskriterien legen fest, anhand welcher Merkmale Pläne bewertet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass situationsunabhängig gültige Bewertungskriterien definiert werden. Zur übersichtlichen Auflistung der Kriterien erfolgt eine Einteilung in zwei Dimensionen. Zum einen werden sie hinsichtlich ihrer Zuordnung zum Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung Parameterraum (3F-Parameterraum) [156] und zum anderen durch die Aspekte Sicherheit, Effizienz und Komfort strukturiert. Einzelne oder alle dieser Aspekte werden üblicherweise für die Modellierung von Kosten herangezogen, so auch beispielsweise in [300]. Der 3F-Parameterraum ermöglicht ein systematisches Erfassen aller zu erwartenden Betriebs- und Einsatzbedingungen und wird daher als strukturierendes Element gewählt. Tabelle 5.2 gibt eine Übersicht über mögliche Bewertungskriterien in dieser Struktur.

Tabelle 5.2: Mögliche Bewertungskriterien der kooperativen Manöverplanung.

	Sicherheit	Komfort	Effizienz
Fahrzeug	Stabilität des Fahrzeugs	Bewegungen in Leistungsgrenzen	Verschleiß & Verbrauch
Fahrumgebung	Verlassen der Fahrbahn & Kollisionen	Annäherung an Fahrbahnrand & Objekte	ineffiziente Route
Fahrer	Sicherheitsgefühl	Wohlfühlbereich	effizientes Fahren

Die Tabelle zeigt beispielhaft, welche Bewertungskriterien es aus Sicht der am 3F-Parameterraum beteiligten Parameter geben könnte. Im Folgenden wird auf jede Kategorie eingegangen und erläutert, was unter der jeweiligen Kategorie zu verstehen ist.

### **Stabilität des Fahrzeugs**

Mit Stabilität des Fahrzeugs sind Kostenterme gemeint, die eine Aussage über den Fahrzustand des Fahrzeugs erlauben. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich ein Fahrzeug ohne Hindernisse auf einer unendlich großen Fläche bewegt. Trotz dieser theoretischen Annahme ist es möglich, dass das Fahrzeug in einen instabilen Fahrzustand gerät. Beispielsweise kann eine aufschaukelnde Lenkbewegung bei mehrmaliger Wiederholung zum Überschlag des Fahrzeugs führen. Auch ist es möglich, dass es beim Übertreten des Kraftschlusspotenzials zu einem instabilen Fahrzustand kommt.

### **Bewegungen in Leistungsgrenzen**

In einem Plan wird die Durchführung von Manövern mit unterschiedlich anspruchsvollen Trajektorien von den Fahrzeugen erwartet. Demnach soll in diesem Punkt bewertet werden, wie weit die vom Fahrzeug erwarteten Handlungen von den Leistungsgrenzen entfernt liegen und somit eine große oder weniger große Herausforderung für die technischen Möglichkeiten des Fahrzeugs darstellen.

### **Verschleiß & Verbrauch**

In diesem Punkt können jene Kostenterme zusammengefasst werden, die den Verschleiß und/oder Verbrauch beim Durchfahren einer Trajektorie abschätzen. Somit können Verschleiß und Verbrauch bedingt durch zum Beispiel starke Beschleunigungen oder Verzögerungen entsprechend berücksichtigt werden.

### **Verlassen der Fahrbahn & Kollisionen**

Die Pläne, deren Kosten berechnet werden sollen, beinhalten kein Verlassen der Straße oder Kollisionen mit anderen Objekten. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen höher, wenn Objekte dicht auffahren oder sehr nahe aneinander vorbeifahren. Sobald der Abstand einen Sicherheitsabstand unterschreitet, finden Kostenterme dieser Kategorie Anwendung.

### **Annäherung an Fahrbahnrand & Objekte**

Neben einem Sicherheitsbereich kann es vom Fahrer empfundene Komfortbereiche geben, deren Verletzung nicht direkt sicherheitskritisch wird. Dennoch würde ein solches Manöver gewisse Mehrkosten gegenüber einem nicht den Komfortbereich verletzenden Manöver aufweisen.

### **Ineffiziente Route**

Durch das Durchfahren von schmutzigen Straßenbereichen oder sonstigen Untergrundänderungen kann ein erhöhter Verschleiß und Verbrauch auch durch die Fahrumgebung ausgelöst werden. Diese Kategorie fasst alle Kostenterme zusammen, die diesen Umstand berücksichtigen.

### **Sicherheitsgefühl**

Die Definition eines Sicherheitsabstandes, der unter keinen Umständen verletzt werden darf, kann dem Fahrer ein gewisses Sicherheitsgefühl verleihen. Dieser kann in Längs- und Querrichtung dafür sorgen, dass der Abstand zu anderen Objekten oder dem Fahrbahnrand größer als eigentlich nötig gehalten werden kann.

### **Wohlfühlbereich**

Neben dem Sicherheitsgefühl kann ein Wohlfühlbereich dafür sorgen, dass ein Fahrer seine Wunschgrößen wie Wunschgeschwindigkeit und Wunschfahrstreifen beibehalten oder erreichen kann. Andersherum ist es auch denkbar, dass gewisse Beschleunigungen oder Beschleunigungsricks negative Bewertungen nach sich ziehen und daher vermieden werden.

### **Effizientes Fahren**

Unter dem effizienten Fahren werden diejenigen Punkte zusammengefasst, die der Fahrer hinsichtlich der Effizienz der Pläne bewertet haben möchte. Dabei können beispielsweise Wunschverbräuche eine Rolle spielen. Auch die Dauer für ein Manöver oder die zu absolvierende Strecke können Aspekte des effizienten Fahrens sein.

Für die Umsetzung der kooperativen Manöverplanung als Sicherheitsfunktion spielen nicht alle aufgezählten Aspekte eine Rolle. Daher wird die Planbewertung im Weiteren auf die folgenden Bewertungskriterien beschränkt:

- Stabilität des Fahrzeugs:  
Durch die Bewertung der *Ausnutzung des Kraftschlusspotenzials* soll eine Abschätzung über die Stabilität des Fahrzeugs erfolgen.
- Verschleiß & Verbrauch:  
Durch ein rudimentäres Modell soll der erhöhte *Verbrauch* durch Beschleunigungen bestraft werden.
- Verlassen der Fahrbahn & Kollisionen + Annäherung an Fahrbahnrand & Objekte:  
*Abstände zum Fahrbahnrand* und *Abstände zu statischen und dynamischen Objekten* werden hinsichtlich sicherheitsrelevanter und komfortrelevanter Annäherungen berücksichtigt.
- Sicherheitsgefühl:  
Sicherheitsabstände gehen in die Abstandsbetrachtungen ein und werden bei Unterschreitung durch hohe Kosten bestraft. Darüber hinaus wird ein *Sicherheitsfaktor* eingeführt, der die Ersetzungsrate zwischen einerseits sicherheits- und andererseits komfort- bzw. effizienzrelevanten Kosten errechnet.
- Wohlfühlbereich:  
Der *Fahrkomfort* wird dem Wohlbefinden des Fahrers zugeteilt, der sich beispielsweise in der Limitierung der maximalen *Beschleunigungen*, in *Wunschgeschwindigkeiten* oder in *Wunschfahrstreifen* äußert.

### 5.3.2 Primärkostenberechnung

Mit der Definition der Bewertungskriterien ist ein Teil der Bewertungsmetrik bestimmt. Weiterhin offen bleibt die Frage, wie die Primärkosten aus diesen Bewertungskriterien berechnet und Unstetigkeiten vermieden werden. Diese Frage lässt sich in zwei Teile zergliedern.

1. Wie werden physikalische Größen in Primärkosten umgerechnet und Unstetigkeiten vermieden?
2. Wie erfolgt die Differenzierung von kleinen, mittleren und hohen Primärkosten?

#### 1. Umrechnung von physikalischen Größen in Primärkosten

Nachfolgend werden die im vorherigen Abschnitt hervorgehobenen Bewertungskriterien durch physikalische und geometrische Gleichungen beschrieben. Dabei besteht nicht der Anspruch einer vollständigen Beschreibung der Phänomene. Vielmehr stellen die Kostenfunktionen Beispiele dar, die aufgrund des modularen Aufbaus beliebig erweitert und angepasst werden können. Zu jeder Kostenfunktion wird ein gültiger Wertebereich angegeben, um mathematische Unstetigkeiten der Kostenfunktionen handhabbar zu gestalten.

Stabilität des Fahrzeugs - Ausnutzung des Kammschen Reibungskreises:

Es soll abgebildet werden, wie viel des zur Verfügung stehenden Kraftschlusspotenzials ausgenutzt wird. Grundlage für diesen Kostenterm ist der Kammsche Reibungskreis. Die resultierenden Primärkosten sagen aus, wie dicht die aufgetretenen Beschleunigungswerte an der maximalen Grenze liegen. Dazu wird das Maximum der gleichzeitig auftretenden Längs- und Querbeschleunigungen  $a_{\text{Längs}}$  bzw.  $a_{\text{Quer}}$  gespeichert und mit der zur Verfügung stehenden, maximal auf den Boden übertragbaren Beschleunigung verglichen. Die maximalen Werte werden hier verwendet, da es sich beim einmaligen Übertreten des Kraftschlusspotenzials bereits um einen instabilen Fahrzeugzustand handelt. Durch die Normierung auf das maximal zur Verfügung stehende Kraftschlusspotenzial können Werte im Intervall  $[0; 1]$  angenommen werden.

$$K_1(\|a_{\text{Längs}}, a_{\text{Quer}}\|) = \max \left( \frac{a_{\text{Längs}}^2 + a_{\text{Quer}}^2}{g^2 \cdot \mu} \right) \quad (5.28)$$



### Verschleiß & Verbrauch - Verbrauch:

Um Beschleunigungsvorgänge bewerten zu können, soll der Verbrauch durch ein sehr einfaches Modell auf Basis der Längsbeschleunigung  $a_{\text{Längs}}$  abgebildet werden. Dabei gehen nur positive Beschleunigungswerte in die Berechnung ein. Eine Normierung auf die Erdbeschleunigung findet zur Abbildung auf das Intervall  $[0; 1]$  statt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass dieses sehr einfache Modell gewählt wurde, da die Funktionalität von Sicherheitsfunktionen nicht auf das Einsparen von zum Beispiel Kraftstoff abzielt. Für durch die kooperative Manöverplanung umgesetzte Effizienzfunktionen müsste ein deutlich detaillierteres Modell zum Einsatz kommen.

$$K_2(a_{\text{Längs}}) = \frac{a_{\text{Längs}}}{g} \quad (5.29)$$

Verlassen der Fahrbahn/Annäherung an Fahrbahnrand & Kollisionen - Abstände zum Fahrbahnrand & zu statischen und dynamischen Objekten:

Die Abstände zum Fahrbahnrand und zu anderen Objekten sind ein wichtiges Kriterium für die Bewertung von robusten Lösungen. Dabei wird nach kurzen Überlegungen deutlich, dass der reine Abstand zwischen Objekten keine Aussage über dessen Kritikalität zulässt. Ein Abstand von zwei Metern ist beispielsweise beim Stehen vor einer roten Ampel völlig unproblematisch, beim Fahren mit  $130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  auf einer Autobahn jedoch deutlich zu klein. Neben dem Einfluss von Geschwindigkeiten und Fahrtrichtung verdeutlicht das nächste Beispiel, dass trotz hoher Geschwindigkeiten auch ein Abstand von zwei Metern trotz entgegengesetzter Fahrtrichtung unproblematisch sein kann. Als Beispiel dient eine Landstraßenfahrt, auf der sich Fahrzeuge teilweise mit weniger als zwei Metern Querabstand und einer hohen Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung begegnen. Demnach wird zunächst eine Unterteilung in Längs- und Querabstände vorgenommen. Weiterhin werden in beiden Abstandsrichtungen die Geschwindigkeiten und Fahrtrichtungen als beeinflussende Größe mit aufgenommen.

- Längsabstand:

Der Längsabstand  $d_{\text{ist}}^{\text{Ego-[Gegner/Straße]}}$  eines Objektes zu einem anderen Objekt oder zu Fahrbahnmarkierungen der Straße wird als kürzestmöglicher Abstand berechnet. Dieser wird auf Basis einer sicheren Stillstandsentsfernung  $d_{\text{sicher}}^{\text{Ego}}$  geschwindigkeitsadaptiv in Primärkosten umgerechnet. Wenn der Längsabstand gleich oder größer als die Stillstandsentsfernung ist, werden im Stillstand Primärkosten von eins oder größer berechnet. Wenn die Eigengeschwindigkeit  $v_{\text{ist}}^{\text{Ego}}$  größer als Null ist, wird die Stillstandsentsfernung um die Bewegungsentsfernung erweitert. So wird bei gleich schnellen Objekten zur Stillstandsentsfernung der halbe Egogeschwindigkeitswert in Metern addiert, um die Bewegungsentsfernung zu erhalten. Dieser Term geht aus der Daumenregel „halber Tachoabstand“ hervor. Liegt eine Relativgeschwindigkeit zwischen dem Egofahrzeug und dem Objekt  $v_{\text{ist}}^{\text{Ego}} - v_{\text{ist}}^{\text{Gegner}}$  vor, dann ändert sich die Bewegungsentsfernung zusätzlich. Sie wird größer, wenn es sich um ein entgegenkommendes Objekt handelt. Analog dazu fällt sie, wenn sich das Objekt vom Egofahrzeug entfernt. Die Verwendung von Differenzgeschwindigkeiten kommt nur bei Objekten, nicht jedoch bei der Zuordnung der Längsentsfernung zu Fahrbahnmarkierungen der Straße zum Tragen. Somit ergibt sich ein Kostenterm, der Werte im Intervall  $[0; \infty)$  annimmt.

$$K_3(\dots) = \frac{d_{\text{ist}}^{\text{Ego-[Gegner/Straße]}}}{d_{\text{sicher}}^{\text{Ego}} + \frac{3.6}{2} \cdot (v_{\text{ist}}^{\text{Ego}} + (v_{\text{ist}}^{\text{Ego}} - v_{\text{ist}}^{\text{Gegner}} \cdot \cos(\psi^{\text{Ego}} - \psi^{\text{Gegner}})))} \quad (5.30)$$

- Querabstand:

Analog zum Längsabstand werden ausgehend von einem sicheren Stillstandsquerabstand  $D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}}$  mittels der minimal berechneten Querentfernung  $D_{\text{ist}}^{\text{Ego-[Gegner/Straße]}}$  Primärkosten berechnet. Auch hier wird der Stillstandsquerabstand beim Vorliegen einer Geschwindigkeit  $v_{\text{ist}}^{\text{Ego}}$  um einen Bewegungsquerabstand erweitert. Dazu wird die Differenzgeschwindigkeit  $v_{\text{ist}}^{\text{Ego}} - v_{\text{ist}}^{\text{Gegner}}$  der Objekte berechnet. Bei der Berechnung der Primärkosten in Querrichtung zu Fahrbahnmarkierungen der Straße wird die Differenzgeschwindigkeit der Objekte mit der Eigengeschwindigkeit ersetzt. Ein empirisch ermittelter Faktor  $\zeta$ , der fahrumgebungsspezifisch berechnet wird, lässt die Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit ohne Unterschreitung

des sicheren Bewegungsquerabstands in der Mitte der Fahrstreifen fahren. Mit anderen Worten wird  $\zeta$  so bestimmt, dass durch das Fahren in der Mitte eines Fahrstreifens keine Querkosten entstehen. Die Berechnung von  $\zeta$  kann im Anhang in Kapitel A.7 nachvollzogen werden. Somit bildet der Kostenterm auf das Intervall  $[0; \infty)$  ab.

$$K_4(\dots) = \frac{D_{\text{ist}}^{\text{Ego}-(\text{Gegner}/\text{Straße})}}{D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}} \cdot (1 + \zeta \cdot (v_{\text{ist}}^{\text{Ego}} - v_{\text{ist}}^{\text{Gegner}} \cdot \cos(\psi^{\text{Ego}} - \psi^{\text{Gegner}})))} \quad (5.31)$$

Beim Betrachten der beiden Kostenfunktionen fällt auf, dass ein kleiner Abstand kleine Primärkosten erzeugt. Dies widerspricht dem logischen Verständnis von Abstandskosten, die groß sein sollten, wenn der Abstand klein ist. Dieser Umstand wird durch den Umgang mit den Primärkosten im nächsten Berechnungsschritt behoben. Wichtig ist weiterhin, dass Primärkosten in Längsrichtung nur vor einem Fahrzeug und Primärkosten in Querrichtung nur neben einem Fahrzeug entstehen können. Primärkosten in Längsrichtung werden nur dann berechnet, wenn der Querkostenterm Primärkosten erzeugt. Diese Regel sorgt dafür, dass nur relevante Längsentfernungen Berücksichtigung finden.

Sicherheitsgefühl - Sicherheitsfaktor:

Als Sicherheitsfaktor wird ein Kostenterm bezeichnet, der eine Einschätzung der Gefährlichkeit des Plans bzw. der Trajektorie zulässt. Dabei ist es bei ungefährlichen Plänen, also solchen, die keine großen sicherheitsrelevante Primärkosten erzeugen, ohne Weiteres möglich, Primärkosten im Komfort- und Effizienzbereich gegen sicherheitsrelevante Primärkosten auszutauschen. Dies würde ein leicht dichteres Auffahren auf Objekte mit einer Verringerung des Verbrauchs begründen. Auf der anderen Seite würde bei sicherheitskritischen Plänen eine weitere Verringerung der Abstände eine sehr hohe Verbrauchsreduzierung erfordern. Mit anderen Worten regelt der Sicherheitsfaktor das Tauschverhältnis zwischen sicherheitsrelevanten Primärkosten auf der einen und Primärkosten im Komfort- und Effizienzbereich auf der anderen Seite. Dabei wird das Maximum der Kosten der sicherheitsrelevanten Kostenterme verwendet.

$$K_5(K_1^*, K_3^*, K_4^*) = \max(K_1^*, K_3^*, K_4^*) \quad (5.32)$$

Hinweis: Die Ergebnisse der Kostenterme  $K_1^*$ ,  $K_3^*$  und  $K_4^*$  stellen nicht die Primärkosten, sondern die endgültig nach Abschnitt 5.3.3 berechneten Kosten dar.

Wohlfühlbereich - Fahrkomfort:

Der Fahrkomfort drückt aus, wie wohl sich ein Fahrer beim Fahren im Fahrzeug fühlt. Dabei haben insbesondere Beschleunigungen eine Auswirkung auf den Fahrkomfort. Der Komfort eines Manövers kann durch das Quadrieren der Längs- und Querbewegung  $a_{\text{Längs}}^2$  bzw.  $a_{\text{Quer}}^2$  ausgedrückt werden (wie auch schon in [59, 230]). Da ein Fahrer möglicherweise empfindlicher auf Längs- als auf Querbewegungen - oder andersherum - reagiert, ist eine unterschiedliche Gewichtung der Längs- bzw. Querbewegung durch Faktoren  $F_L$  bzw.  $F_Q$  möglich. Schließlich wird der berechnete Wert auf die halbe Erdbeschleunigung zum Quadrat normiert. In diese Rechnung geht nur die halbe Erdbeschleunigung ein, damit alle Beschleunigungen über diesem Wert pauschal als unkomfortabel klassifiziert werden und die höchstmöglichen Primärkosten erzeugen. Ohne Beschleunigungen ist der Komfort maximal (eins). Somit gibt die Kostenfunktion  $K_6(F_L, F_Q, a_{\text{Längs}}, a_{\text{Quer}})$  Werte im Intervall  $[-1; 1]$  zurück.

$$K_6(F_L, F_Q, a_{\text{Längs}}, a_{\text{Quer}}) = 1 - \frac{F_L a_{\text{Längs}}^2 + F_Q a_{\text{Quer}}^2}{(F_L + F_Q) \cdot \mu \cdot \left(\frac{g}{2}\right)^2} \quad (5.33)$$

Wohlfühlbereich - Wunschgeschwindigkeit:

Bei der Wunschgeschwindigkeit handelt es sich um eine vom Fahrer erwartete Geschwindigkeit. Diese kann entweder direkt von ihm beispielsweise am Tempomat eingestellt worden sein oder geschätzt werden, beispielsweise anhand des letzten Fahrzustands. Dabei wird die Wunschgeschwindigkeit  $v_{\text{soll}}^{\text{Ego}}$  derart verarbeitet, dass die prozentuale Abweichung von ihr zur aktuellen Geschwindigkeit  $v_{\text{ist}}^{\text{Ego}}$  ermittelt wird. Dazu wird der Quotient aus Wunsch- und Sollgeschwindigkeit gebildet und von eins abgezogen. Die Kostenfunktion bildet Werte im Intervall  $[0; 1]$  ab.

$$K_7(v_{\text{ist}}^{\text{Ego}}, v_{\text{soll}}^{\text{Ego}}) = \begin{cases} \left| 1 - \frac{v_{\text{ist}}^{\text{Ego}}}{v_{\text{soll}}^{\text{Ego}}} \right| & \text{falls } 0 \leq \frac{v_{\text{ist}}^{\text{Ego}}}{v_{\text{soll}}^{\text{Ego}}} < 1 \\ 1 & \text{sonst,} \end{cases}$$

## 2. Differenzierung von Primärkosten

Nachdem die Kostenterme definiert sind, ist nun zu klären, wie eine Einordnung der berechneten Primärkosten erfolgen kann: Sind bei der Kostenfunktion der Wunschgeschwindigkeit Primärkosten von 0,5 viel? Oder kann schon bei einem Ergebnis von 0,75 von hohen Primärkosten gesprochen werden?

Aus der Literatur ist eine Beantwortung ähnlicher Fragestellungen bekannt. Die Methode der Fuzzy-Mengen von Zadeh [324] erlaubt es, unscharfe Mengenzuordnungen durch linguistische Variablen herzustellen. Somit ist es möglich, beispielsweise den Kostenterm *Wunschgeschwindigkeit* mit den Bereichen „kleine Abweichung“, „mittelkleine Abweichung“, „mittlere Abweichung“, „mittelgroße Abweichung“ und „große Abweichung“ zu abstrahieren. Dies erlaubt subjektive Einstellungen für die einzelnen Bereiche vorzunehmen. Diese Zugehörigkeitsfunktionen ermöglichen, bezogen auf die Fuzzy-Funktion (= die zuvor definierte Kostenfunktion), Aussagen über die Erfüllung des Sachverhaltes. Ein Beispiel für die Kostenfunktion der *Wunschgeschwindigkeit* auf Basis der Fuzzy-Mengen ist in Abbildung 5.15 gezeigt. Dabei sind die drei Zugehörigkeitsklassen „kleine Abweichung“, „mittlere Abweichung“ und „große Abweichung“ definiert. Weiterhin muss eindeutig definiert werden, in welchem Intervall die Zugehörigkeitsfunktionen gelten. Dies geschieht bei den verwendeten Formen durch die Definition des Anfangspunkts, des Hochpunkts und des Endpunkts. Für eine Trapezfunktion ist noch ein zweiter Hochpunkt zu definieren. Durch die Definition der Punkte kann eine ganz individuelle Einordnung der Abweichung einer Soll- von der Ist-Geschwindigkeit vorgenommen werden. Die Zugehörigkeitsfunktionen beschränken sich üblicherweise auf Dreiecks-, Trapez- und die Glockenkurvenfunktionen [154]. Für Anwendungen in Software schlagen Schmidt et al. [255] die Verwendung von Dreiecks- und Trapezfunktionen vor, da sie keine wesentlich anderen Ergebnisse als gekrümmte Flanken liefern, jedoch eine höhere Performanz der Programme erwarten lassen. Im Rahmen dieser Arbeit werden aus Performanzgründen Dreiecks- und Rechtecksfunktionen verwendet.

Im folgenden Beispiel werden die Zugehörigkeitsklassen wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \text{kleine Abweichung: } k &\mapsto \begin{cases} \frac{5-k}{5} & \text{falls } 0 \leq k \leq 5 \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \\ \text{mittlere Abweichung: } k &\mapsto \begin{cases} \frac{k}{5} & \text{falls } 0 \leq k \leq 5 \\ \frac{10-k}{5} & \text{falls } 5 \leq k \leq 10 \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \\ \text{große Abweichung: } k &\mapsto \begin{cases} \frac{k-5}{5} & \text{falls } 5 \leq k \leq 10 \\ 1 & \text{falls } 10 \leq k \leq \infty \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \end{aligned}$$

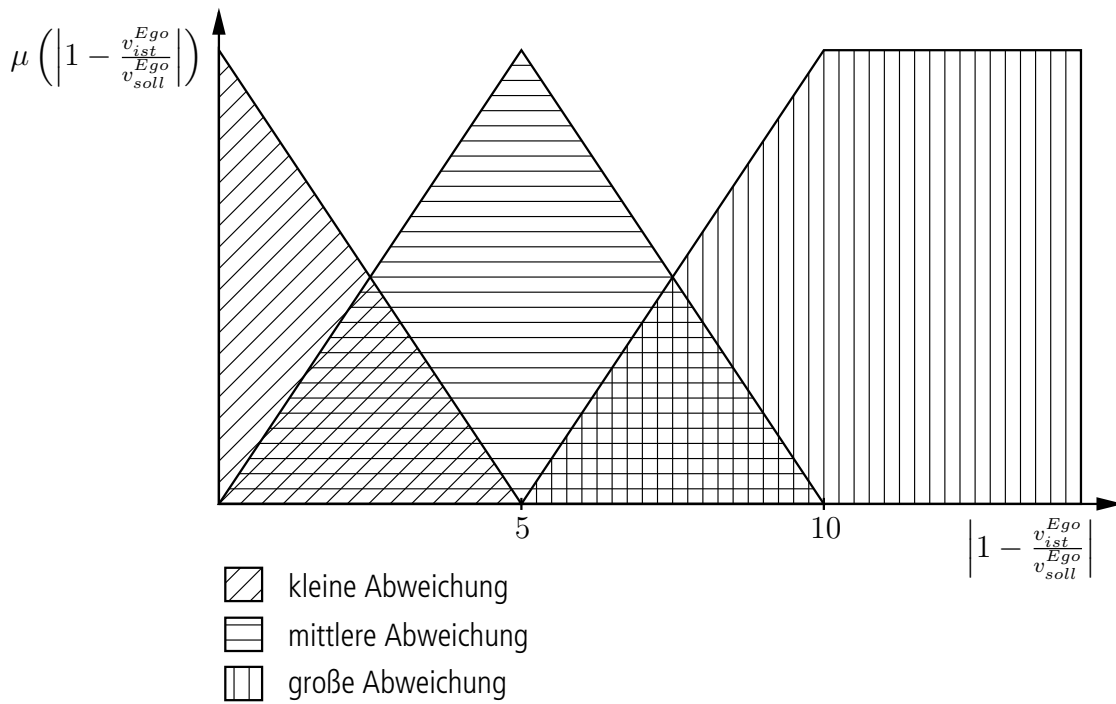


Abbildung 5.15: Fuzzifizierung der Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit.

Somit würde eine Geschwindigkeitsabweichung von 3 % teilweise der Zugehörigkeitsklasse „kleine Abweichung“ und teilweise der Zugehörigkeitsklasse „mittlere Abweichung“ zugeordnet werden. Diese Zuordnung wird anschließend in finale Kosten  $K_n^*$  überführt (siehe nächsten Absatz). Die einzustellenden linguistischen Variablen ermöglichen eine Parametrierung der Kostenfunktion, ohne dabei genaues Wissen über die Funktion selbst vorauszusetzen. Weitere Informationen zu der Verwendung von Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik können der Literatur entnommen werden [154, 155, 255, 324].

Die Verwendung der Fuzzy-Methode in Verbindung mit sicherheitsrelevanten Aufgaben birgt Risiken. Abel et al. [1] weisen darauf hin, dass bei einer steigenden Anzahl von Regeln das Systemverständnis verloren gehen kann. Außerdem besteht die Gefahr, dass sich Regeln widersprechen, und diese Widersprüche, die von Kruse [154] auch als Inkonsistenzen bezeichnet werden, sich nur schwer finden lassen. In der vorliegenden Arbeit wird die Fuzzy-Methode lediglich zur Bewertung bereits als sicher identifizierter Pläne verwendet. Selbst wenn sich Regeln widersprechen, würden im schlimmsten Fall unkomfortable oder potenziell etwas kritischere Pläne gewählt, die jedoch immer kollisionsfrei sind. Um dem Punkt der Widersprüche entgegenzuwirken, wird für jede Kostenfunktion eine eigene Fuzzy-Funktion zugewiesen. Dadurch ist es möglich, den Überblick über die Regeln zu behalten und konsistente Lösungen zu erhalten. Zudem wurden die Kostenfunktionen in ihren Wertebereichen limitiert, was zudem den Effekt hat, dass auch die Fuzzy-Methode nicht in undefinierte Bereiche laufen kann. Wenn die Konventionen ordnungsgemäßer Verwendung der Fuzzy-Methode angewandt werden, ist selbst die Umsetzung von Fuzzy-Reglern möglich [196, 240, 298]. Spezielle Anwendungen beschäftigen sich auch mit einem Fuzzy-Regler für ein ACC [208, 209] sowie für ein ABS [1], wobei für das ABS sowohl die Schätzung der Fahrzeuggeschwindigkeit im Schwerpunkt als auch die eigentliche Regelung auf der Fuzzy-Methode basieren.

### 5.3.3 Finale Kostenberechnung

Nachstehend werden die Verwendung der Kostenfunktionen und die zugehörige Berechnung der finalen Kosten  $K_n^*$  erläutert. Die Errechnung der finalen Kosten ist notwendig, damit die Werte bei Erfüllung bzw. Nichterfüllung des Merkmals ein identisches Verhalten hinsichtlich des Ansteigens oder Abfallens der Werte aufweisen. Die Kostenberechnung unterteilt sich in die Zielpunkt- und die Trajektorienbewertung. Dabei wird jeweils die Fuzzy-Logik zur Berechnung der finalen Kosten verwendet, deren Parametrierung dem Kapitel A.8 des Anhangs für jede Kostenfunktion entnommen werden kann. Die finalen Kosten eines Plans ergeben sich entsprechend aus der Summe der finalen Kosten der beteiligten Zielpunkte und den zu ihnen führenden Trajektorien aller Teilnehmer und werden als Gesamtkosten bezeichnet.

#### Zielpunktbewertung

Jeder Zielpunkt wird mit finalen Kosten belegt. Dabei werden aus den zuvor vorgestellten Kostentermen drei ausgewählt: Wunschgeschwindigkeit, Querabstand und Längsabstand. Im Folgenden wird für jeden Kostenterm die Umrechnung der Primärkosten in finale Kosten beschrieben.

- Wunschgeschwindigkeit

Die Wunschgeschwindigkeit nimmt Werte auf dem  $[0; 1]$  an. Je höher die Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit, also je größer die Primärkosten  $K_7$ , desto größer sollen die finalen Kosten  $K_7^*$  werden.

$$K_7^* \uparrow \text{ wenn } K_7 \uparrow$$

- Querabstand

Der Querabstand bildet Werte im Intervall  $[0; \infty)$  ab. Dabei ist zu beachten, dass kritische Ergebnisse solche nahe Null sind. Große Querabstände sind nicht von noch größeren Querabständen zu unterscheiden, da beide ab einer gewissen Entfernung unkritisch sind. Daher wird die Berechnung der finalen Kosten in Querrichtung auf ein Intervall  $[0; 1]$  limitiert. Das obere Ende des Intervalls ergibt sich, weil die Stillstands- bzw. Bewegungsentfernung erst unterhalb dieses Werts unterschritten wird. Da finale Kosten in Querrichtung nur seitlich berechnet werden sollen, dürfen nicht gleichzeitig finale Kosten in Längs- und Querrichtung zu einem Objekt entstehen. In diesem Fall werden die finalen Kosten in Querrichtung verworfen und nur finale Kosten in Längsrichtung berechnet. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn ein Teilnehmer auf einen anderen zufährt. Durch die Überdeckung (Kosten in Querrichtung) und die Annäherung in Längsrichtung (Kosten in Längsrichtung) würde diese Situation doppelt negativ bewertet werden.

$$K_4^* \uparrow \text{ wenn } K_4 \downarrow \wedge K_4 \leq 1 \wedge K_3^* = 0$$

- Längsabstand

Längsabstände treten ebenfalls im offenen Intervall  $[0; \infty)$  auf. Auch hier sind die durch  $K_3$  berechneten Primärkosten nahe Null die kritischen. Wie auch in Querrichtung macht es für die Längsrichtung ab einer bestimmten, großen Entfernung keinen Sinn mehr, finale Kosten zu berechnen. Daher wird die Berechnung von finalen Kosten in Längsrichtung ebenfalls auf ein Intervall  $[0; 1]$  limitiert, mit derselben Begründung für die vorherige Intervallgrenze. Außerdem stellt nicht jedes sich in Längsrichtung vor einem Objekt befindliche Objekt eine Gefahr dar. Daher muss eine gewisse Überdeckung, abgebildet durch finale Kosten in Querrichtung  $K_4^*$ , vorliegen. Die finalen Kosten in Querrichtung werden in diesem Fall, wie zuvor beschrieben, verworfen.

$$K_3^* \uparrow \text{ wenn } K_3 \downarrow \wedge K_3 \leq 1 \wedge K_4^* > 0$$

### Trajektorienbewertung

Neben den Zielpunkten werden auch die Trajektorien mit finalen Kosten belegt. Dabei werden fünf Kostenterme angewandt. Es handelt sich dabei um die Ausnutzung des Kammschen Reibungskreises, den Verbrauch, die Quer- und Längsabstände, den Sicherheitsfaktor und den Fahrkomfort.

- Ausnutzung des Kammschen Reibungskreises

Bei der Ausnutzung des Kammschen Reibungskreises handelt es sich um eine Kostenfunktion, bei der kleine Primärkosten  $K_1$  auch kleine finale Kosten  $K_1^*$  erzeugen sollen. Je weiter entfernt sich eine Kombination von Längs- und Querbeschleunigung vom Rand des Kammschen Reibungskreises befindet, desto besser, weil stabiler, ist der Zustand. Die Kostenfunktion bildet Werte im Intervall  $[0; 1]$  ab.

$$K_1^* \uparrow \text{ wenn } K_1 \uparrow$$

- Verbrauch

Die Kostenfunktion des Verbrauchs  $K_2$  ist auf dem Intervall  $[0; 1]$  definiert. Bei steigenden Primärkosten  $K_2$  sollten auch die finalen Kosten steigen.

$$K_2^* \uparrow \text{ wenn } K_2 \uparrow$$

- Quer- und Längsabstände

Die hier berechneten Kosten  $K_3^*$  und  $K_4^*$  werden analog zu den Kosten in Quer- und Längsrichtung des Zielpunkts bestimmt.

- Sicherheitsfaktor

Der Sicherheitsfaktor gibt an, wie groß die Gefährdung innerhalb eines Plans ist. Er nimmt durch seine Funktion Werte auf dem Intervall  $[0; 1]$  an. Er wird größer, wenn einer der Werte steigt, da er das Maximum der drei Primärkosten abbildet.

$$K_5^* \uparrow \text{ wenn } K_1^* \uparrow \vee K_3^* \uparrow \vee K_4^* \uparrow$$

- Fahrkomfort

Der Fahrkomfort nimmt Werte auf dem Intervall  $[-1; 1]$  an. Kleinere Primärkosten  $K_6$  bedeuten, dass der Komfort sinkt. Dementsprechend müssen die finalen Kosten in diesem Fall steigen. Zudem wird der Komfort auf ein Intervall  $[0; 1]$  limitiert, da die Unterscheidung zwischen dem Wert 0 und einem negativen Komfortwert keinen weiteren Aufschluss mehr bietet, als dass es sich um einen sehr unkomfortablen Zustand handelt. Dementsprechend sind die finalen Kosten  $K_6^*$  bereits bei Primärkosten von  $K_6 = 0$  maximal.

$$K_6^* \uparrow \text{ wenn } K_6 \downarrow$$

**Zusammenfassung:** Die Planbewertung priorisiert die Vielzahl von erzeugten Plänen anhand von unterschiedlichen Bewertungskriterien. Diese Bewertungskriterien werden durch Kostenfunktionen ausgedrückt, die sich in die zwei Dimensionen des 3F-Parameterraums (Fahrer, Fahrzeug, Fahrumgebung) und die Verkehrseigenschaft (Sicherheit, Komfort, Effizienz) einordnen lassen. Die Berechnung der Kostenfunktionen unterliegt teilweise physikalischen, teilweise fahrerspezifischen Größen. Mithilfe von Fuzzy-Mengen werden Möglichkeiten geschaffen, fahreradaptive Parametrierungen von Kostenfunktionen vorzunehmen. Somit werden finale Kosten aus Primärkosten jeder Kostenfunktion bestimmbar. Finale Kosten werden sowohl den Zielpunkten als auch den Trajektorien zugeschrieben, die zusammen für alle Teilnehmer die finalen Kosten (Gesamtkosten) eines Plans ergeben.

## 5.4 Modul III - Planauswahl

Ziel der kooperativen Manöverplanung ist die Auflösung einer Konfliktsituation durch ein kooperatives Fahrmanöver. Die zuvor durchgeführte Bewertung erzeugt eine Liste von Plänen, die mit Kosten aller Beteiligten versehen ist. Dabei sind nach der Definition des kooperativen Verhaltens aus Kapitel 3 der Gesamtnutzen bzw. die Gesamtkosten das entscheidende Kriterium und nicht die isolierte Kostenbetrachtung für jeden Beteiligten. Die Gesamtkosten sollen im Folgenden die Grundlage der Entscheidung für einen der Pläne darstellen. Dabei muss unterschieden werden, ob die kooperative Manöverplanung durch eine zentrale oder mehrere dezentrale Planungseinheiten verwendet wird. Eine zentrale Planungseinheit ist beispielsweise ein Teilnehmer der Instanz (PKW, LKW, Fußgänger, ...) oder eine unbeteiligte Recheneinheit (ITS Road Side Unit, Cloud, ...). Die Planauswahl geschieht entsprechend zentral. Bei dezentralen Planungseinheiten wird von mehreren Planungseinheiten ausgegangen, die dieselbe Problem Instanz lösen. Hierbei handelt es sich um eine dezentrale Planauswahl.

### Zentrale Auswahl

Bei der zentralen Auswahl wird derjenige Plan gewählt, der die kleinsten Gesamtkosten aufweist. Unabhängig von der vorliegenden Referenzsituation ist damit garantiert, dass er das Gesamtkostenminimum darstellt. Damit diese zentrale Auswahl die Präferenzen der Teilnehmer tatsächlich abbildet, muss ein hinreichend genaues Wissen über die Präferenzen vorliegen. Diese müssen der zentralen Planungseinheit vor Bewertung der Pläne bekannt sein. Für den Fall, dass keine Präferenzen der Teilnehmer bekanntgegeben wurden, müssen Standardwerte verwendet werden. Diese ermöglichen die Bewertung der einzelnen Kostenterme, besitzen jedoch auch die Gefahr, Kosten falsch einzuschätzen. Beim Vorliegen unsicheren Wissens über die Präferenzen der Teilnehmer wird daher vorgeschlagen, eine dezentrale Planauswahl durchzuführen.

### Dezentrale Auswahl

Bei der dezentralen Planauswahl wird eine Auswahl an Plänen an die Teilnehmer der Konfliktinstanz versandt, die nur eine Vorauswahl darstellt. In diesen Plänen bewertet nun jeder Teilnehmer seinen Zielpunkt und seine Trajektorie aus seiner individuellen Perspektive. Nachdem dieser Prozess abgeschlossen ist, werden die Ergebnisse untereinander ausgetauscht und nach einer vorgegebenen Operation verrechnet. Eine gleichberechtigte Methode stellt dabei das Aufsummieren der Einzelkosten dar. Wichtig bei der dezentralen Auswahl ist, dass sich die finalen Kosten, die jeder Teilnehmer für einen Plan vergibt, in einer untereinander vereinbarten Skala bewegen. Weiterhin setzt dieses Verfahren Fairness voraus, da von einem objektiven, auch sich selbst benachteiligenden Bewerter ausgegangen werden muss. Eine detaillierte Beschreibung eines dezentralen Prozesses anhand eines Beispiels ist in Abschnitt 6.3.2 gegeben.

Bei regelkonformer und fairer Bewertung der Beteiligten ist in beiden Planauswahlverfahren garantiert, dass ein Optimum aus den berechneten Plänen gefunden wird. Bei der Betrachtung der Gesamtkosten bzw. des Gesamtnutzens gibt es also keine Veranlassung, den ermittelten Plan nicht zu befolgen. Wenn die Beteiligten jedoch ihre individuellen Kosten minimieren bzw. Nutzenwerte maximieren möchten, besteht die Gefahr, dass diese vom vereinbarten Optimum abweichen. Dass einzelne Beteiligte dies trotzdem nicht tun, kann nur dadurch verhindert werden, dass der individuelle Nutzen der Beteiligten bei Planbefolgung höher liegt als ohne. Durch die in der Definition von kooperativem Verhalten fest vorgeschriebene Berücksichtigung von vergangenem Verhalten kann davon ausgegangen werden, dass der individuelle Nutzen im Mittel für alle höher ist. Dies lässt sich vor allem damit begründen, dass bei der Durchführung eines Plans mit höherem Gesamtnutzen Nutzen gegenüber der Referenzsituation gewonnen wird. Der Nutzen wandert nicht von einem Beteiligten zum nächsten, es handelt sich also nicht um ein Nullsummenspiel, sondern im Mittel werden beide Teilnehmer bessergestellt. Ergo steigt durch die Berücksichtigung der Reziprozität der individuelle Nutzen im Mittel bei Planbefolgung und bietet somit keinen Grund der Nichtbefolgung.

## 5.5 Umgang mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern

In der Form, wie die kooperative Manöverplanung zuvor beschrieben wurde, wird davon ausgegangen, dass alle Beteiligten geplant und in ihrer Bewegung beeinflusst werden können. Diese Annahme der hundertprozentigen Einflussmöglichkeit ist gerade in der Einführungsphase der kooperativen Manöverplanung sehr fragwürdig, da wegen der niedrigen Durchdringungsrate nur eine kleine Chance besteht, dass diese Einflussmöglichkeit in der dann auftretenden, gefährlichen Situation besteht. Um diesen Umstand zu vermeiden, soll das System auch mit *nicht beeinflussbaren* Teilnehmern umgehen können.

Das Verhalten von nicht beeinflussbaren Teilnehmern ist von eminenter Wichtigkeit für die sichere Durchführung der kooperativen Manöverpläne. Sie verfügen möglicherweise über Funkhardware, sind jedoch nicht in der Lage, einem berechneten Plan zu folgen. Es ist möglich, eine Worst-Case-Annahme für das Verhalten der nicht beeinflussbaren Teilnehmer als Planungsgrundlage zu nehmen (wie beispielsweise in [151]), an dessen Ende ein wahrscheinlich sicherer Plan steht. Diese Worst-Case-Annahmen beschränken die Pläne oftmals derart, dass nur eine kleine oder gar keine Lösungsmenge zur Auswahl übrig bleibt. Daher wird von Worst-Case-Annahmen Abstand genommen und Ansätze in der Richtung von Situationsprädiktionen weiterverfolgt. Die Prädiktionsmodelle berechnen wahrscheinliche Trajektorien für nicht beeinflussbare Teilnehmer. Diese werden bei der Planerzeugung als Verhalten dieser Teilnehmer berücksichtigt, so dass für die anderen, beeinflussbaren Teilnehmer die Handlungsmöglichkeiten weiterhin wie zuvor beschrieben berechnet werden können. Dabei hängt die Bestimmung von sicheren Endzuständen und sicheren Trajektorien nun zusätzlich von den nicht beeinflussbaren Teilnehmern ab. Ein eigens entwickeltes Prädiktionsmodell basiert auf Modulen der kooperativen Manöverplanung (Zielpunktberechnung und Trajektorienberechnung), die für den Einsatz zur Prädiktion in sicherheitskritischen Situationen angepasst wurden. Die Herleitung des Prädiktionsmodells steht nicht im Fokus dieser Arbeit und kann der Literatur entnommen werden [13]. Es berechnet, genau wie die kooperative Manöverplanung, Endzustände und Trajektorien zu diesen Endzuständen, verwirft Kollisionen jedoch nicht. In sicherheitskritischen Situationen ist es denkbar, dass der Fahrer die Straße verlässt oder eine Kollision herbeiführt. Die Auswahl der wahrscheinlichsten Trajektorie geschieht über verschiedene Kostenfaktoren, die einerseits die statische und andererseits die dynamische Situationsbetrachtung betreffen. In der statischen Situationsbetrachtung werden Zustände, wie beispielsweise das Verlassen der Fahrbahn, schlechter bewertet als ein Verbleiben auf dem eigenen Fahrstreifen. Weiterhin haben Kollisionen mit statischen Hindernissen höhere Kosten zur Folge als ein Umfahren dieser Hindernisse. Die dynamische Situationsbetrachtung ermittelt zunächst eine Priorität der Verkehrsteilnehmer, um ein wahrscheinliches Verhalten mithilfe einer prioritätenbasierten Planung vorauszusagen. Ein straßenverkehrskonformes Verhalten sorgt für eine hohe Priorität, während zum Beispiel das Fahren auf der falschen Straßenseite eine niedrige Priorität zur Folge hat. Nachdem die Prioritäten und die damit verbundenen Verhalten ermittelt sind, werden die Handlungsoptionen des zu prädizierenden Verkehrsteilnehmers analog zur statischen Situationsbetrachtung bewertet. Bewertet wird das Auftreten von Kollisionen, das nahe Vorbeifahren an anderen Objekten oder das dichte Auffahren an vorausfahrende Fahrzeuge. Das Ergebnis ist eine wahrscheinlichste Trajektorie, die als Grundlage zur Planberechnung in der kooperativen Manöverplanung angenommen wird.

Durch das Prädiktionsmodell in sicherheitskritischen Situationen wird eine Einbeziehung von nicht beeinflussbaren Teilnehmern möglich. Der modulare Aufbau der kooperativen Manöverplanung erlaubt auch die Verwendung von anderen Prädiktionsmodellen. Da das beschriebene Prädiktionsmodell neben den benötigten Informationen auch die notwendigen Detailinformationen im korrekten Datenformat liefert, wird es für die Prädiktion von nicht beeinflussbaren Teilnehmern verwendet. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass es sich um ein Modell handelt, welches Vorhersagen auf Basis von vergangenem Verhalten und der Umgebung ableitet, und daher auch falsche Verhaltensweisen prädizieren kann. Für diesen Fall wird, wie im Falle von der Nichtbefolgung von Plänen, auf das Überwachungsmodul von Balaghiasefi et al. [14] verwiesen, welches die Abweichung erkennt und Gegenmaßnahmen einleitet.



## 5.6 Eigenschaften und Bewertung der kooperativen Manöverplanung

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften der kooperativen Manöverplanung zusammengefasst und anschließend bewertet. Tabelle 5.3 zeigt eine Übersicht der Eigenschaften, die nachstehend kompakt erläutert werden.

Tabelle 5.3: Eigenschaften der kooperativen Manöverplanung.

Eigenschaften		Architekturvorschlag
Planungs	-ziel	Berechnung $n$ geeigneter Pläne als Kombinationen aller Einzelhandlungsmöglichkeiten
	-häufigkeit	einmalig
	-schritte	geometrische Planung der Zielpunkte und Trajektorien heuristische Auswahl, Kombinatorik
	-modelle	Einradmodell, Kammscher Reibungskreis
	-teilnehmer	beeinflussbare und nicht beeinflussbare Teilnehmer
	-inhalt	Trajektorie für alle kooperativen Teilnehmer
Anwendung	für straßenge- bundene Fahrzeuge	✓
	in Umgebung	Autobahn, Landstraße, Stadt
	Verkehrseigenschaft	Sicherheit, Komfort, Effizienz
	in Sicherheit	Unfallvermeidung
Annahmen	Entkopplungen	Fahrzeugbewegungsberechnung nicht entkoppelt Pfad und Geschwindigkeitsberechnung nicht entkoppelt Quer- und Längsrichtungsberechnung nicht entkoppelt
	Einschränkung auf	$v \geq 0, \psi(t) = \psi(0) \pm 90^\circ, \psi(0 \wedge T) \parallel$ Straßenbegrenzung
Methode	Anzahl der Fahrzeuge	$2^*$ bis $n$
	Komplexität	exponentiell (Anzahl der Fahrzeuge)
	sichere Trajektorien	✓
	sichere Endzustände	✓
	letzte stetige Größe	Längsrichtung: Geschwindigkeit; Querrichtung: Querbesehleunigung
	Planungsgrundlage	ist-Situation (Fahrzeug und Umgebung)
	Berücksichtigung von	Modellparameter (Fahrerpräferenzen, Fahrzeugfähigkeiten)
Ausgabe	Anzahl Pläne	1 bis $m$
	Größen	$x, y, v, a, \psi$

\* Die kooperative Manöverplanung kann, obwohl konzeptionell für mehrere Fahrzeuge gedacht, auch zur Planung einzelner Fahrzeuge eingesetzt werden.

Die kooperative Manöverplanung ist in der Lage, Manöverpläne zu berechnen, die mehrere Fahrzeuge ( $n$  Fahrzeuge) gleichzeitig umfassen. Dazu werden die Einzelhandlungsmöglichkeiten berechnet und die daraus resultierenden Kombinationen gebildet (englischer Name: COMbining oPportunities of ACTION (COMPACT)). Die Planungsmethode wird einmalig ausgeführt und berechnet die Zielpunkte aller Teilnehmer und die dahin führenden Trajektorien mittels eines geometrischen Verfahrens auf Basis des Einradmodells. Weiterhin werden die Bedingungen des Kammschen Reibungskreises zu jeder Zeit erfüllt. Die kooperative Manöverplanung erlaubt die Planung für sowohl ausschließlich mit dem System ausgestattete Fahrzeuge (Ausstattung = 100 %) als

auch Mischverkehr zwischen nicht ausgestatteten und ausgestatteten Fahrzeugen (Ausstattung  $< 100\%$ ). Die Berücksichtigung nicht ausgestatteter Verkehrsteilnehmer erfolgt durch ein Prädiktionsmodell, welches die wahrscheinlichste Trajektorie als Planungsgrundlage zur Verfügung stellt. Durch die verwendeten Modelle und Annahmen ist es in straßengebundenen Fahrzeugen einsetzbar und keiner Beschränkung hinsichtlich der Anwendbarkeit in unterschiedlichen Fahrumgebungen (Autobahn, Landstraße, Stadt) und der Anwendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz unterworfen. Hinsichtlich der Sicherheit wird lediglich die Unfallvermeidung adressiert, da die Modellierung unterschiedlicher Unfallfolgen und eine moralische Entscheidung bezüglich der Inkaufnahme von Unfalltoten außerhalb des Fokus dieser Arbeit liegen. Weiterhin wurden Annahmen bezüglich des Lösungsraums getroffen, die sich auf ein Vorwärtsfahren und ein parallel zur Fahrbahn ausgerichtetes Fahrzeug beziehen. Diese Einschränkungen erlauben eine Vielzahl an Szenarien im Längsverkehr, können bei Bedarf jedoch aufgehoben werden, da sie dem Konzept nicht widersprechen. Der Lösungsraum wird im Gegensatz zu anderen Methoden weder hinsichtlich der Fahrzeugpriorisierung ([10]), der Berechnung von Pfaden und Geschwindigkeiten ([43, 175, 176, 178, 179]) noch hinsichtlich der Berechnung der Längs- und Querbeschleunigung ([139, 288, 289]) entkoppelt. Diese Entkopplungen stellen häufig verwendete Vereinfachungen zur Reduzierung der Komplexität dar. Grundsätzlich kann für  $n$  Fahrzeuge geplant werden, wobei die Komplexität durch die nicht entkoppelte Berechnung exponentiell ist. Die kooperative Manöverplanung könnte auch für die Planung eines einzelnen automatischen Fahrzeugs verwendet werden, ist jedoch für die Planung von mehreren Teilnehmern konzipiert. Diverse Überprüfungen gewährleisten sowohl sichere Trajektorien als auch sichere Endzustände. Die letzte stetige Größe ist in der Längsrichtung die Geschwindigkeit und in Querrichtung die Beschleunigung. Zugrundeliegende Parameter sind die Fahrumgebung, die Fahrzeugeigenschaften und die Fahrerpräferenzen. Die Zustandsrepräsentation beinhaltet die Position, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die Fahrzeugausrichtung zu einem Zeitpunkt  $t$ . Je nach Anwendung kann die kooperative Manöverplanung  $m$  Pläne ausgeben. Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass sichere Pläne berechnet werden können, werden Pärchen für die Kollisionsüberprüfung gebildet, Zwischenergebnisse gespeichert und der Suchraum der Lösungen in unterschiedlichen Bereichen besucht. Die Auffächerung des Suchraums geschieht hinsichtlich der Trajektorienauswahl einzelner Teilnehmer und hinsichtlich der Kombination der Trajektorien. Bei der Trajektorienauswahl stellt eine Ähnlichkeitsanalyse sicher, dass zu Beginn maximal unterschiedliche Trajektorien für die Verpaarung verwendet werden. Die Kombination durchläuft ein vordefiniertes Muster, welches sicherstellt, dass nicht zunächst nur Kombinationen aus allen Trajektorien von Teilnehmer A mit vielen von Teilnehmer B und wenigen von Teilnehmer C angelegt und überprüft werden - so wie es bei einfach in sich verschalteten Schleifen der Fall ist. Durch diese Maßnahmen soll die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, dass selbst bei einem Abbruch der Methode aus Zeitgründen Lösungen der kooperativen Manöverplanung vorliegen.

### Einordnung und Bewertung

Die Einordnung und Bewertung der kooperativen Manöverplanung soll anhand der aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bekannten Methoden vorgenommen werden. Dabei werden alle Methoden den Anforderungen der dritten Forschungsfrage nach einer Fahrmanöverkoordinationsmethode gegenübergestellt. Tabelle 5.4 gibt einen Überblick über die Anforderungserfüllung der kooperativen Manöverplanung und der sechs aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bekannten Methoden.

Die Tabelle zeigt, dass die kooperative Manöverplanung alle an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Gerade die **Berücksichtigung sicherer Endzustände** und die **Anwendbarkeit für Sicherheit, Komfort und Effizienz** unterscheidet die kooperative Manöverplanung von bekannten Methoden. Auch die **Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen & Fahrzeugfähigkeiten** finden in weiterem Maße statt als vom Stand der Wissenschaft und Technik bekannt. Es fällt auf, dass alle anderen Anforderungen auch von der Formulierung als *Optimalsteuerungsproblem*, von der Methode der *gerichteten Graphen* und der Methode des *elastischen Bands* erfüllt werden. Im Sinne einer genaueren Analyse kommen diese drei Verfahren für einen simulativen Vergleich in Frage. Dieser wird in Abschnitt 6.2.3 beschrieben und durchgeführt. Es bleibt festzuhalten, dass die kooperative Manöverplanung durch die Erfüllung aller Anforderungen und durch die Verwendung einer bisher ungenutzten Methode Neuigkeitswert besitzt.

Tabelle 5.4: Gegenüberstellung von Anforderungen und Manöverplanungsmethoden.

Anforderungen	Methoden						
	Optimalsteuerungsproblem	Leader-Follower	gerichtete Graphen	elastisches Band	Zustandsautomat	Reglergesetze	kooperative Manöverplanung
Planung mehrerer Fahrzeuge	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Trajektorien für alle Teilnehmer	✓		✓	✓			✓
Berücksichtigung nicht beeinflussbarer Teilnehmer	✓		✓	✓			✓
keine Entkopplung	✓		✓	✓			✓
Anwendbarkeit bei straßengebundenen Fahrzeugen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anwendung in allen Umgebungen	✓	(✓)	✓	✓	(✓)	(✓)	✓
Anwendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz							✓
Anwendung zur Unfallvermeidung	✓		✓	✓			✓
Berücksichtigung sicherer Trajektorien	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Berücksichtigung sicherer Endzustände							✓
Planungsgrundlage sind Fahrzeuge & Umgebung	✓		✓	✓	✓		✓
Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen & Fahrzeugfähigkeiten	(✓)		(✓)	(✓)			✓

## 5.7 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wird mit der kooperativen Manöverplanung eine Fahrmanöverkoordinationsmethode für den Einsatz in einem fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem entwickelt. Dazu wird das Prinzip der kooperativen Manöverplanung beschrieben, welches auf der Erzeugung von sicheren Plänen basiert, die aus sicheren Endzuständen und sicheren Trajektorien dorthin für jeden Teilnehmer bestehen. Dabei werden die sicheren Endzustände durch einen zweistufigen Prozess berechnet, der zuerst technisch mögliche Endzustände mittels einer Erreichbarkeitsmenge ermittelt und diese anschließend durch eine Risikoanalyse als sicher klassifiziert. Das Attribut sicher wird aus einer individuellen und einer gemeinschaftlichen Perspektive verliehen, bei der Endzustände unterschiedlicher Teilnehmer kombiniert betrachtet werden. Nicht sichere Endzustandskombinationen werden verworfen und nicht weiter betrachtet. Bei den sicheren Trajektorien wird ein sehr ähnliches Vorgehen gewählt. Sie werden zunächst ausgehend vom Startpunkt zu jedem sicheren Endzustand berechnet, wobei auch dies in einem zweistufigen Verfahren geschieht. Auch hier werden zunächst technisch plausible Trajektorien erzeugt, die anschließend ebenfalls durch eine Risikoanalyse als individuell und gemeinschaftlich sicher bzw. unsicher markiert werden. Aus gemeinschaftlich sicheren Endzuständen und dorthinführenden, sicheren Trajektorien werden sichere Pläne. Diese sicheren Pläne werden einer Bewertung mit parametrierbaren Kostenfunktionen unterzogen, die die Sicherheit, den Komfort und die Effizienz berücksichtigen. Um die Eigenschaften der Pläne in finale Kosten zu überführen, wird die Fuzzy-Methode angewandt, dessen zuverlässiger Einsatz im sicherheitskritischen Umfeld sichergestellt wurde.

Je nach Einsatz ist eine zentrale oder dezentrale Variante der kooperativen Manöverplanung in der Lage, unterschiedlich viele Pläne auszugeben und entsprechend der Definition von kooperativem Verhalten zu verteilen. Gerade für die Einführungsphase des Systems ist der Umgang mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern wichtig. Die Eigenschaften der kooperativen Manöverplanung werden anschließend zusammenfassend erläutert. Eine Gegenüberstellung mit dem Stand der Wissenschaft und Technik zeigt einerseits, dass die kooperative Manöverplanung die an sie gestellten Anforderungen erfüllt und andererseits, dass sie Neuigkeitswert gegenüber dem Stand der Wissenschaft und Technik besitzt. Die Berücksichtigung sicherer Endzustände, in denen der Fahrer das Fahrzeug nach Durchführung einer kooperativ aufgelösten Konfliktsituation wieder sicher übernehmen kann, und die Anwendbarkeit für Sicherheit, Komfort und Effizienz stellen neben der Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen & Fahrzeugfähigkeiten Merkmale dar, die im Stand der Wissenschaft und Technik nicht oder nur teilweise behandelt werden.

**Somit kann die dritte Forschungsfrage, das Suchen nach einer Fahrmanöverkoordinationsmethode, durch die kooperative Manöverplanung beantwortet werden.**

# 6 Anwendung und Ergebnisse

Die drei vorangegangenen Kapitel leiten Antworten auf die drei Forschungsfragen zur Realisierung eines fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems her. In diesem Kapitel werden die erarbeiteten Methoden in der Simulation angewandt und evaluiert, um den Reifegrad und die qualitative Erfüllung der Anforderungen zu belegen.

Die drei Forschungsfragen wurden mit der Definition des kooperativen Verhaltens, der Methode der kooperativen Abstimmung und der Methode der kooperativen Manöverplanung beantwortet. Die vorgestellten Methoden erfüllen alle an sie gestellten Anforderungen qualitativ. In diesem Kapitel werden quantitative Ergebnisse und Anwendungen vorgestellt, die auf Simulationen beruhen. Dazu werden in Abschnitt 6.1 die verwendeten Testumgebungen beschrieben und zugrunde gelegte Einstellungen erläutert. Daran schließt sich die Evaluation der kooperativen Manöverplanung in Abschnitt 6.2 an, die einerseits durch einen quantitativen Anforderungsabgleich und andererseits durch eine Bewertung der Methode mittels eines Vergleichs mit aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bekannten Methoden erfolgt. Anschließend wird die kooperative Abstimmung in Abschnitt 6.3 beleuchtet. Derivate der kooperativen Abstimmung zeigen die geforderte Flexibilität anhand von Beispielsituationen. Abschließend werden Aspekte der Definition des kooperativen Verhaltens in Abschnitt 6.4 evaluiert und anhand von Beispielsituationen aufgezeigt. An die Untersuchungen schließt sich für jede Forschungsfrage eine Zusammenfassung und ein Ausblick aufgeworfener, bisher nicht behandelter Aspekte an. Das Kapitel wird von Abschnitt 6.5 abgeschlossen, welches eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse liefert.

Die Ziele des Kapitels sind

1. die verwendeten Testumgebungen und Grundeinstellungen zu erläutern,
2. die kooperative Manöverplanung durch
  - einen Anforderungsabgleich zu evaluieren und
  - einen simulativen Vergleich mit Methoden aus dem Stand der Wissenschaft und Technik einzuordnen,
3. die kooperative Abstimmung durch einen
  - Anforderungsabgleich zu evaluieren,
4. die Definition kooperativen Verhaltens durch einen
  - Anforderungsabgleich zu evaluieren, sowie
5. eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf offene Fragestellungen zu geben.

Die Ausführungen dieses Kapitels basieren zum Teil auf bereits vom Autor veröffentlichten Beiträgen [57, 58, 60, 230, 304] und erweitern die bisher publizierten Erkenntnisse.

## 6.1 Testumgebungen und Grundeinstellungen

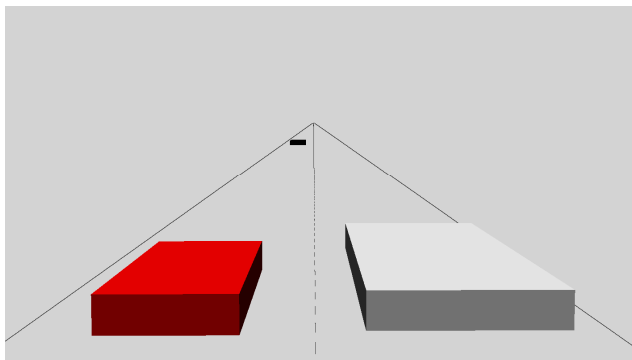
Dieser Abschnitt behandelt die Testumgebungen und die verwendeten Grundeinstellungen. In Abschnitt 6.1.1 werden die zwei verwendeten Testumgebungen, ein SiL- und ein HiL-Verfahren, erläutert. Abschnitt 6.1.2 beschreibt die verwendeten Einstellungen bezüglich der Fahrumgebungen und der Fahrzeuge. Diese Einstellungen werden für die jeweiligen Umgebungen bzw. Fahrzeugklassen in den nachfolgenden Simulationen verwendet.

### 6.1.1 Testumgebungen

Die verwendeten Testmethoden bieten die Möglichkeit, vernetzte Fahrerassistenz- und Sicherheitsfunktionen zu evaluieren, die Längs- und Quereingriffe durchführen. Aus Sicherheitsgründen wird in diesem frühen Stadium des kooperativen Systems von Realversuchen zugunsten von virtuellen Testumgebungen abgesehen. Um die virtuellen Tests trotzdem unter maximal realistischen Bedingungen ablaufen zu lassen, werden die Tests einerseits im Zielsoftwareframework im SiL-Verfahren und andererseits im Zielhard- und Zielsoftwareframework im HiL-Verfahren durchgeführt. Das SiL-Verfahren hat zum Ziel, konzeptbedingte Eigenschaften unter Laborbedingungen nachzuweisen, während das HiL-Verfahren die Fahrzeugreaktion abbildet, welches Rückschlüsse über verwendete Modelle zulässt und das Verhalten des Realfahrzeugs angenähert abbildet. Im Folgenden wird auf technische Eigenschaften der beiden Testumgebungen eingegangen, die in Abbildung 6.1 dieselbe Überhol-situation auf einer Landstraße zeigen.

#### SiL-Verfahren

Das SiL-Verfahren basiert auf dem von Elektrobit entwickelten Framework Automotive Data and Time-Triggered Framework (ADTF), welches mittels C++ programmiert wird. Es handelt sich bei ADTF um eine Middleware für Fahrzeugfunktionen, die sich in den letzten Jahren für die Entwicklung neuartiger Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme etabliert hat. Neben der Verwendung als Tool zur Konzeptvalidierung besteht bei ADTF auch die Möglichkeit, Schnittstellen von Versuchsfahrzeugen anzusteuern. Dies hat den Vorteil, dass am Computer entwickelte und validierte Methoden zur Verwendung in Versuchsfahrzeugen nicht erneut portiert werden müssen. Zur Konzeptvalidierung, wie sie auch in dieser Arbeit durchgeführt wird, können Eingangsparameter aus eigens generierten Testdaten oder Realfahrten eingelesen und den entwickelten Algorithmen zur Verfügung gestellt werden. Daraus erzeugt die kooperative Manöverplanung einen Sollverlauf für die Fahrzeugtrajektorien, welche dem Entwickler angezeigt, von den Fahrzeugen abgefahren oder intern weiterverarbeitet werden können. Weitere Informationen zum ADTF können der Literatur entnommen werden [21, 63]. Abbildung 6.1a zeigt eine mittels des ADTF-Moduls 3DSceneDisplay erstellte grafischen Oberfläche der Simulationsumgebung. Die Quader stellen Fahrzeuge dar, die Straßenmarkierungen sind durch schwarze Linien angedeutet. In dieser Ausprägung handelt es sich um eine Simulationsumgebung, die zur ersten Konzeptvalidierung keinerlei Fahrzeugmodelle bei der Planbefolgung hinterlegt.



(a) SiL-Verfahren in ADTF



(b) HiL-Verfahren in ADTF-VTD [58]

Abbildung 6.1: Darstellung einer Situation in den Simulationsumgebungen.

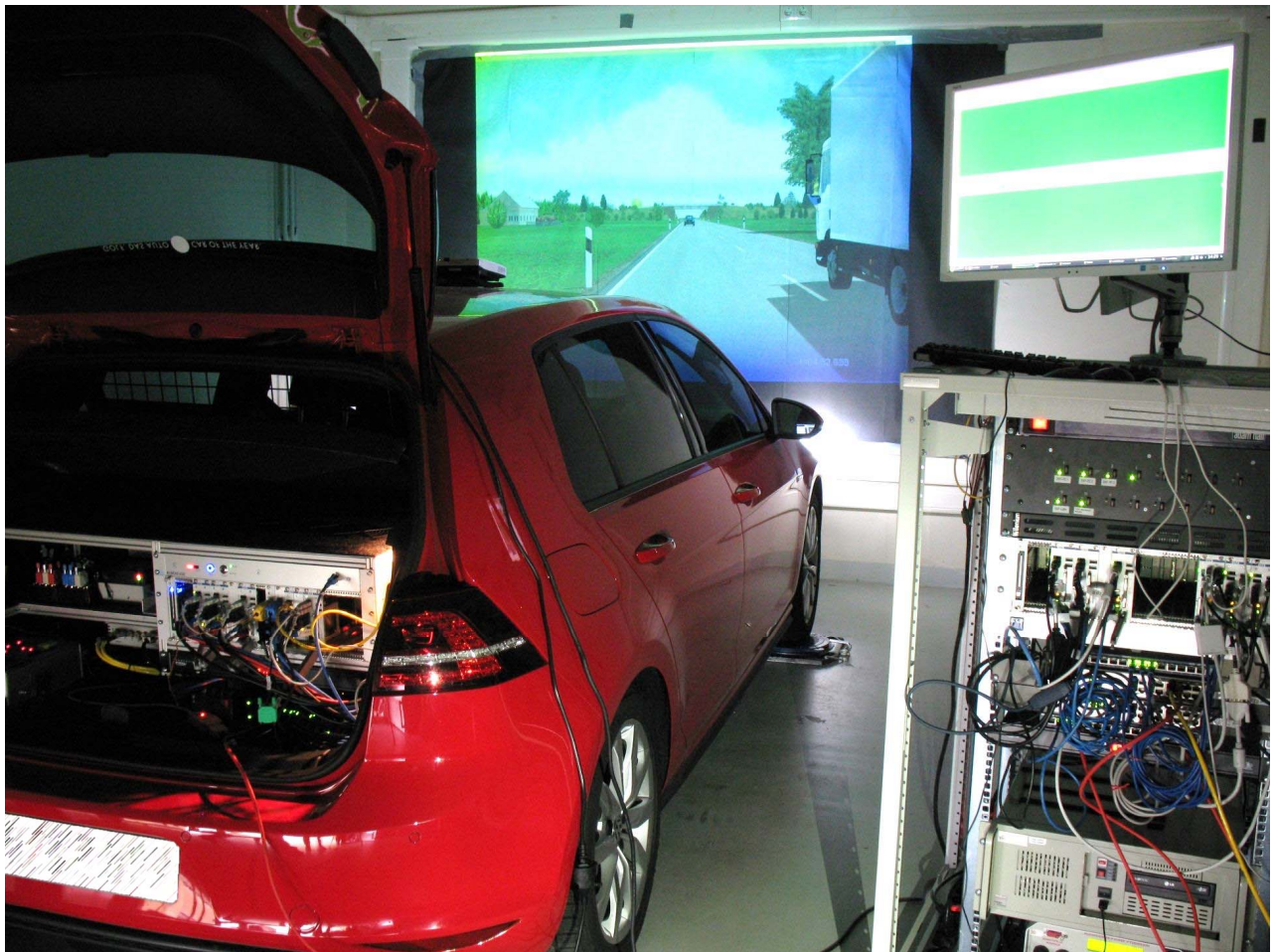


Abbildung 6.2: Versuchsstand zum Erleben des Kooperativen Fahrens [58].

### HiL-Verfahren

Das HiL-Verfahren nutzt die in ADTF erzeugten Ergebnisse und steuert die durch ein Fahrzeugmodell simulierte Fahrzeuge einer Simulationsumgebung mittels ihrer realen Hardware. Das Vollfahrzeugmodell wird als ADTF-Filter eingebunden, mit den Fahrzeugeigenschaften parametrisiert und mit den Eingabewerten Lenkwinkel und Längsbeschleunigung betrieben [87]. Die Fahrzeugregelung läuft auf einer dSpace MicroAutoBox [54], welche ein Echtzeitsystem für schnelle Funktionsentwicklung und -erprobung darstellt. Bei der Fahrzeugregelung wird auf einen bestehenden Längs- und Querregler zurückgegriffen [87]. Das realitätsgetreuere Anzeigemedium stellt das von der Firma Vires entwickelte Virtual Test Drive (VTD) dar. Weitere Informationen zur Verwendung von VTD im Zusammenhang mit der Entwicklung von Fahrerassistenz- und Sicherheitssystemen und der Kopplung mit ADTF können vom Hersteller bezogen oder der Literatur entnommen werden [205, 296, 305]. Eine Hinter-Fahrzeug-Kameraperspektive von VTD ist in Abbildung 6.1b gezeigt. Durch die realitätsnähere Abbildung der Umgebung ist es, neben der Analyse des Verhaltens reeller Fahrzeughardware, auch möglich, einen Versuchsstand zu betreiben, der Probandenstudien zum Kooperativen Fahren ermöglicht. Entsprechend ausgerüstete Versuchsfahrzeuge können mithilfe eines Ethernetkabels an die HiL-Simulation angeschlossen und anschließend manuell gesteuert werden. Abbildung 6.2 zeigt den Aufbau bestehend aus einem Versuchsfahrzeug, der Versuchsleiterhardware und einer Leinwand. Somit können sich Probanden mittels eines echten Fahrzeugs manuell oder automatisiert in Situationen bringen, die beispielsweise mit der kooperativen Manöverplanung aufgelöst werden sollen.

Zusammenfassend bedeutet das, dass zwei Simulationsumgebungen zur Konzeptvalidierung, Erprobung und Demonstration für Methoden des Kooperativen Fahrens entwickelt sind und genutzt werden können.



### 6.1.2 Grundeinstellungen

Damit die Simulationen mit realistischen Fahrumgebungen und Fahrzeugen durchgeführt werden können, werden im Folgenden deren Werte bestimmt. Die Fahrumgebungen unterteilen sich in Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen, für die Fahrstreifenbreiten und Höchstgeschwindigkeiten aus der Literatur entnommen werden. Die Fahrzeugklassen werden in PKW und LKW unterschieden, deren geometrische Abmessungen und Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsvermögen ermittelt werden.

#### Fahrumgebungen

Das Autobahnscenario spielt sich auf einer geraden, zweistreifigen Autobahn mit einem endenden Beschleunigungsstreifen ab. Die Fahrstreifenbreiten sind den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) [73] entnommen. Für eine zweistreifige Ausführung einer Autobahn der Entwurfsklasse für Autobahnen (EKA) 1 wird der Regelquerschnitt (RQ) 31 mit einer Fahrstreifenbreite von 3,75 m verwendet. Eine Höchstgeschwindigkeit ist durch die Straßenart nicht festgelegt. Sie soll für die folgenden Untersuchungen mit der Richtgeschwindigkeit von  $130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  gleichgesetzt werden. Die Mindestgeschwindigkeit liegt bei  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ .

Das Landstraßenszenario wird durch einen einbahnig zweistreifigen Querschnitt repräsentiert. Die Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) [74] schreiben für diese Art der Landstraße mit dem RQ 11 eine Breite von 3,5 m je Fahrtrichtung vor. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ .

Das Stadtszenario soll auf einem einbahnig zweistreifigen Abschnitt stattfinden, in dem sich Fahrzeuge entgegengesetzter Fahrtrichtungen begegnen können. Die Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) [72] sehen für einen solchen Abschnitt eine Gesamtbreite von 6,5 m, also 3,25 m je Fahrtrichtung, vor. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt in den nachfolgenden Untersuchungen  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ .

Tabelle 6.1 fasst die Werte der Fahrumgebungen zusammen. Der Reibbeiwert der drei Fahrumgebungen wird mit  $\mu = 1$  angenommen.

Tabelle 6.1: Werte der Fahrumgebungen [72–74].

Szenario	Fahrstreifenbreite [m]	Höchstgeschwindigkeit [ $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ ]	Mindestgeschwindigkeit [ $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ ]	Reibbeiwert
Autobahn	3,75	130	60	1
Landstraße	3,50	100	-	1
Stadt	3,25	50	-	1

#### Fahrzeugklassen

Für die folgenden Untersuchungen werden zwei unterschiedliche Fahrzeugklassen eingeführt. Dabei handelt es sich um die Fahrzeugklassen *PKW* und *LKW*. Hierbei sollen repräsentative Geometrien und Fähigkeiten der jeweiligen Fahrzeugklasse verwendet werden.

Hinsichtlich der Geometrien der Fahrzeugklassen werden Bemessungsfahrzeuge [256] verwendet. Bemessungsfahrzeuge sind Fahrzeuge, die dem 85 % Fahrzeug dieser Fahrzeugklasse entsprechen. Die in 2001 festgesetzten Geometrien legen die Länge bzw. Breite inklusive Spiegel eines PKW mit 4,74 m bzw. 1,76 m fest. Für einen zweiachsigen LKW wird eine Länge bzw. Breite inklusive Spiegel von 9,46 m bzw. 2,29 m abgegeben. Da von offizieller Seite keine aktuelleren Untersuchungen der Fahrzeuggeometrien vorliegen, werden diese Werte für die Fahrzeugklassen verwendet.



Die Fähigkeiten, also die maximal erreichbaren Längs- und Querbeschleunigungen, hängen stark vom Fahrzeugmodell und vom Zustand des Fahrzeugs (Geschwindigkeit, Gang, Betriebszustand der Bremse) ab. Brösdorf et al. [28] zeigen die Bandbreite an Beschleunigungs- und Verzögerungsfähigkeiten unterschiedlicher Fahrzeugmodelle auf. Donath [51] beschreibt mittlere Beschleunigungs- und Verzögerungsfähigkeiten für die verwendeten Fahrzeugklassen PKW und LKW als Grundlage zur Unfallrekonstruktion. Die mittleren Beschleunigungswerte sind demnach maßgeblich vom Verhältnis Gewicht zu Motorleistung abhängig. Für die Fahrzeugklassen wird aufgrund der fehlenden Information bezüglich des Leistungsgewichts der größte gemeinsame Wert gewählt. Die Beschleunigungsfähigkeit der PKW wird zu  $2,5 \frac{m}{s^2}$ , die der LKW zu  $1 \frac{m}{s^2}$  bestimmt. Für die Verzögerungsfähigkeiten wird auf trockener Fahrbahn für PKW ein Wert von  $9 \frac{m}{s^2}$  und für LKW ein Wert von  $5,5 \frac{m}{s^2}$  ermittelt. Tabelle 6.2 stellt die verwendeten Werte dar.

Tabelle 6.2: Werte der Fahrzeugklassen [51, 256].

Fahrzeugeigenschaften	PKW	LKW
Länge [m]	4,74	9,46
Breite [m]	1,76	2,29
maximale Beschleunigung [ $\frac{m}{s^2}$ ]	2,5	1
maximale Verzögerung [ $\frac{m}{s^2}$ ]	9	5,5

## 6.2 Kooperative Manöverplanung

Dieser Abschnitt stellt die Simulationsergebnisse der kooperativen Manöverplanung dar. Dazu werden in Abschnitt 6.2.1 die durchgeführten Tests und die dazu verwendeten Szenarien beschrieben. Die durchgeführten Tests und deren Ergebnisse sind in Abschnitt 6.2.2 gezeigt. Abschnitt 6.2.3 stellt die Tests und Ergebnisse des Vergleichs der kooperativen Manöverplanung mit Manöverplanungsmethoden des Stands der Wissenschaft und Technik dar. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick auf offene, noch zu behandelnde Themen wird in Abschnitt 6.2.4 gegeben.

Die zur Erzeugung verwendeten Werte der Risikoanalyse und die Einstellungen der Kostenfunktion sowie die Verrechnung der Kosten können zum besseren Verständnis der Ergebnisse im Anhang in Abschnitt A.6 und A.8 nachvollzogen werden.

### 6.2.1 Test- und Szenarienbeschreibung

Die konzeptionelle Erfüllung der in Abschnitt 1.1 definierten Anforderungen wurde in Abschnitt 5.6 aufgezeigt. Im Folgenden wird die Erfüllung der Anforderungen simulativ nachgewiesen und diskutiert. Zum Test der Anforderungen werden Testszenarien definiert, in denen die kooperative Manöverplanung zur Anwendung kommt. Wenn nicht anders beschrieben, werden die Anforderungen im SiL-Verfahren überprüft. Zum Nachweis der Anwendbarkeit des Algorithmus bei straßengebundenen Fahrzeugen, in allen Umgebungen, für Sicherheit, Komfort und Effizienz sowie zur Unfallvermeidung werden fünf Szenarien definiert. Die Unfallvermeidung soll in allen drei Umgebungen zur Anwendung kommen. Für die Umgebung der Autobahn wird eine Autobahnauffahrsituation mit drei Fahrzeugen gewählt, da dies als kritischster Moment des Autobahnfahrens gilt und neben Autobahnbaustellen als Schwachstelle für die Sicherheit bezeichnet wird [12, 163]. Bereiche mit Ein- bzw. Ausfahrten wurden zudem in einer Studie als primäre Unfallschwerpunkte auf einem Teilabschnitt der Bundesautobahn 2 identifiziert [169]. Beim Fahren auf der Landstraße stellt nach dem Abkommen eines Fahrzeugs von der Fahrbahn ein missglückter Überholversuch die zweithäufigste Unfallursache dar. Gerade wegen der hohen Kollisionsgeschwindigkeiten gehören Überholunfälle zu den folgenschwersten Landstraßenunfällen

[11, 115]. Daher wird das Überholen als Situation ausgewählt. In der Stadt folgen aus Überschreitenunfällen die häufigsten Todesfälle [271]. Diese Situation wird mit Verkehr aus beiden Richtungen dargestellt, damit die kooperative Manöverplanung zur Anwendung kommen kann. Um der Anforderung der Anwendbarkeit für Sicherheit, Komfort und Effizienz gerecht zu werden, muss neben der bereits beschriebenen Anwendung für Sicherheit noch je eine Situation für effizientes und komfortables Fahren dargestellt werden. Das effiziente Fahren wird durch eine Landstraßensituation gezeigt, bei der Fahrzeuge einen Fahrstreifenwechsel in einer Formation (Platoon) von drei Fahrzeugen durchführen. Das Fahren in einem Platoon wird durch die verbesserte Effizienz bei der Fortbewegung beispielsweise durch verringerte Luftwiderstände motiviert [204, 288]. Komfortables Fahren soll an einer unkritischen Auffahrsituation auf die Autobahn mit zwei Fahrzeugen demonstriert werden. Mit den vorstehend definierten Situationen sind ebenfalls sowohl die Forderungen nach der Anwendung in allen Umgebungen als auch die Anwendbarkeit bei straßengebundenen Fahrzeugen erfüllt. Auch die Anforderungen, dass die Planungsmethode die Planung einer unterschiedlichen Anzahl von Fahrzeugen durchführt, Trajektorien für alle Teilnehmer und Fahrzeuge berechnet und die Umgebung als Planungsgrundlage verwendet, wird in diesen Situationen demonstriert. Zum Nachweis der Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen und Fahrzeugfähigkeiten wird eine identische Situation mit einerseits zwei unterschiedlichen Fahrerpräferenzen und andererseits zwei unterschiedlichen Fahrzeugfähigkeiten aufgelöst. Dabei zeigt sich, dass andere Lösungen für sonst identische

Tabelle 6.3: Tests der kooperativen Manöverplanung.

Nachweis von	Szenarienbeschreibung	Szenario	Verfahren
Anwendbarkeit bei straßengebundenen Fahrzeugen	Sicherheit, Komfort & Effizienz jede Umgebung einmal Unfallvermeidung in allen Umgebungen	A3S, A3K Ü3, P3 F2	SiL
Anwendbarkeit in allen Umgebungen			
Anwendbarkeit für Sicherheit, Komfort und Effizienz			
Anwendbarkeit zur Unfallvermeidung			
Planung mehrerer Fahrzeuge			
Trajektorien für alle Teilnehmer			
Planungsgrundlage sind Fahrzeuge & Umgebung	unterschiedliche Fahrerpräferenzen und Fahrzeugfähigkeiten	A3K	SiL
Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen und Fahrzeugfähigkeiten			
keine Entkopplung	zwei und drei Teilnehmer, unterschiedliche Parametrierung	A3S, Ü3 F2	SiL
Berücksichtigung sicherer Trajektorien	Sicherheit der Trajektorien / Endzustände wird überprüft	T2	SiL, HiL
Berücksichtigung sicherer Endzustände			
Berücksichtigung von nicht beeinflussbaren Teilnehmern	eine Situation mit 66 % Ausstattung	Ü3	SiL
Vergleich Stand der Wissenschaft und Technik	unterschiedliche Planer lösen identische Situation	Ü3	SiL

**Legende:** Auffahren auf die Autobahn mit drei Fahrzeugen für Sicherheitsfunktion (A3S); Auffahren auf die Autobahn mit drei Fahrzeugen für Komfortfunktion (A3K); Fußgänger auf einer Stadtstraße mit zwei Fahrzeugen (F2); Platooning auf einer Landstraße mit drei Fahrzeugen (P3); Türöffnung trotz Verkehr auf Stadtstraße mit zwei Fahrzeugen (T2); Überholen auf der Landstraße mit drei Fahrzeugen (Ü3).

Situationen ausgerechnet werden können. Hierfür wird mit dem Auffahren auf die Autobahn eine Komfortsituation gewählt, da diese größeren Spielraum bei der Lösungsfindung zulässt. Dass der Algorithmus keiner Entkopplung unterliegt, wird ebenfalls mithilfe dieser Komfortsituation gezeigt. Die nicht vorhandene Entkopplung und die daraus resultierende Komplexität führen zu einer weiteren Untersuchung, die die Parametrierung des Algorithmus betrifft. Dazu werden die Auswirkungen der Parametrierung in sicherheitskritischen Situationen untersucht. Die Berücksichtigung sicherer Trajektorien und Endzustände wird in einer sicherheitskritischen Situation überprüft. Dabei kommt erstmals neben der SiL-Testumgebung auch die HiL-Testumgebung zum Einsatz. Schließlich wird die Erfüllung der Anforderung der Berücksichtigung nicht beeinflussbarer Verkehrsteilnehmer durch ein Überholzenario auf der Landstraße gezeigt. Dazu wird eines der drei Fahrzeuge als nicht beeinflussbares Fahrzeug angenommen. Die Ausstattungsrates beträgt dementsprechend 66 %.

Neben dem Anforderungsnachweis wird ein Vergleich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik durchgeführt. Da die Methoden des Stands der Wissenschaft und Technik für die Fahrzeugsicherheit konzipiert sind, wird eine Situation aus der Unfallvermeidung gewählt. Es handelt sich um das sicherheitskritische Überholen auf der Landstraße, welches in leicht abgeänderten Konstellationen untersucht wird. Tabelle 6.3 fasst die nachzuweisenden Anforderungen, die Szenarienbeschreibung, die Szenarien und das verwendete Testverfahren zusammen.

### 6.2.2 Anforderungsabgleich

Die quantitative Erfüllung der zu untersuchenden Anforderungen wird entsprechend der Szenarien aus Tabelle 6.3 simuliert, und die Ergebnisse der Simulation werden nachstehend präsentiert.

Zunächst wird die Anforderung der Anwendbarkeit in der Unfallvermeidung in den drei Szenarien kritisches Auffahren auf die Autobahn, riskanter Überholversuch auf der Landstraße und ein plötzlich auftauchendes Hindernis beim Befahren einer Stadtstraße untersucht.

Abbildung 6.3 zeigt Momentaufnahmen des ersten Szenarios, des kritischen Auffahrens auf die Autobahn.

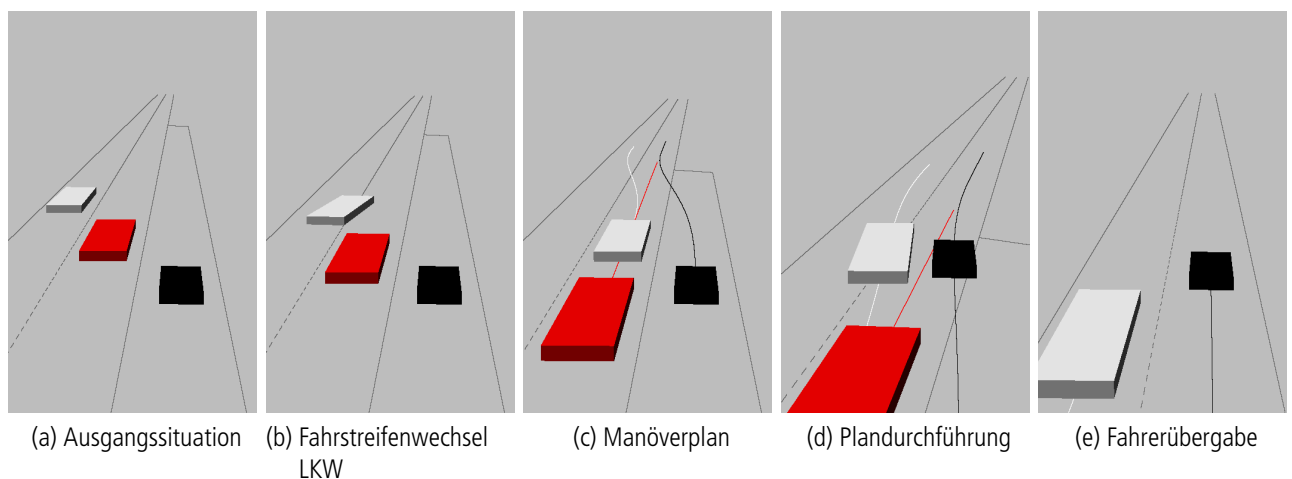


Abbildung 6.3: Unfallvermeidung beim Auffahren auf die Autobahn mit drei Fahrzeugen (A3S).

Ein PKW (schwarzes Fahrzeug) fährt auf dem Beschleunigungsstreifen und hat das Ziel, auf die Autobahn aufzufahren. Da es schneller als ein sich auf dem rechten Fahrstreifen befindlicher LKW (rotes Fahrzeug) fährt, plant es diesen zu überholen und vor diesem auf die Autobahn zu fahren (Abbildung 6.3a). Ein für das schwarze Fahrzeug verdeckter LKW (weißes Fahrzeug) führt ein Fahrstreifenwechselmanöver durch und besetzt somit den rechten Fahrstreifen vor dem roten Fahrzeug, Abbildung 6.3b. Der so entstandene Konflikt kann vom schwarzen Fahrzeug nicht mehr alleine gelöst werden, da es zu schnell ist, um mithilfe einer Notbremsung vor dem Ende

des Beschleunigungsstreifens zum Stehen zu kommen. Dieser Zeitpunkt stellt den zu planenden Zustand für die kooperative Manöverplanung dar, dessen Ergebnis in Abbildung 6.3c gezeigt ist. Der Plan sieht vor, dass das rote Fahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen verbleibt, während das weiße Fahrzeug erneut seinen Fahrstreifen wechselt, um dem schwarzen Fahrzeug das Auffahren zu ermöglichen. Abbildung 6.3d zeigt ferner einen Moment der automatisierten Plandurchführung, an dessen Ende die Übergabe an den Fahrer (Abbildung 6.3e) steht.

Das zweite Szenario beschäftigt sich mit einem riskanten Überholversuch auf der Landstraße (Abbildung 6.4).

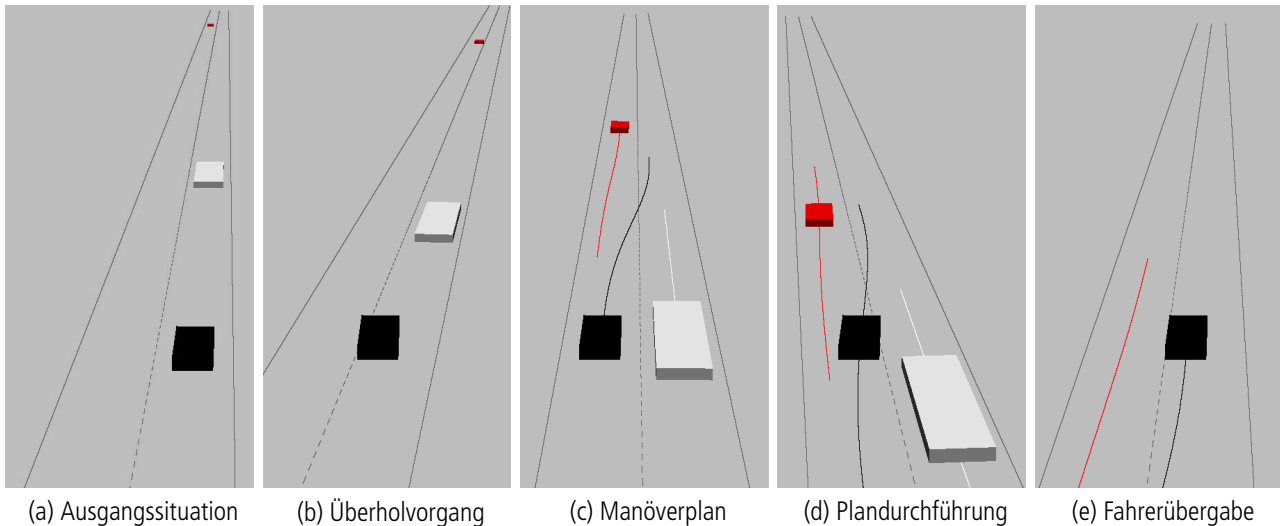


Abbildung 6.4: Unfallvermeidung beim riskanten Überholversuch auf einer Landstraße mit drei Fahrzeugen (Ü3).

Die Ausgangssituation (Abbildung 6.4a) ist durch einen PKW (schwarzes Fahrzeug) beschrieben, der hinter einem langsameren LKW (weißes Fahrzeug) fährt. Das schwarze Fahrzeug setzt anschließend, wie in Abbildung 6.4b zu erkennen ist, zum Überholvorgang an, ohne ausreichend auf möglichen Gegenverkehr zu achten. Abbildung 6.4c zeigt die Konfliktsituation, in der die Manöverplanung einen Plan bestimmt, der das rote Fahrzeug anweist, durch ein Ausweichmanöver im eigenen Fahrstreifen Platz zu schaffen, während der LKW durch ein Bremsmanöver Platz erzeugen soll. Einen Moment der Plandurchführung zeigt Abbildung 6.4d, in dem das schwarze Fahrzeug den Fahrstreifenwechsel bereits eingeleitet hat. Abbildung 6.4e illustriert den Moment der möglichen Fahrerübergabe als aufgelöste Situation ohne weiteres Gefährdungspotenzial, da alle Fahrzeuge mit ausreichend Abstand zueinander in ihrem Fahrstreifen fahren.

In der letzten sicherheitskritischen Situation taucht beim Befahren einer Stadtstraße plötzlich ein Hindernis auf.

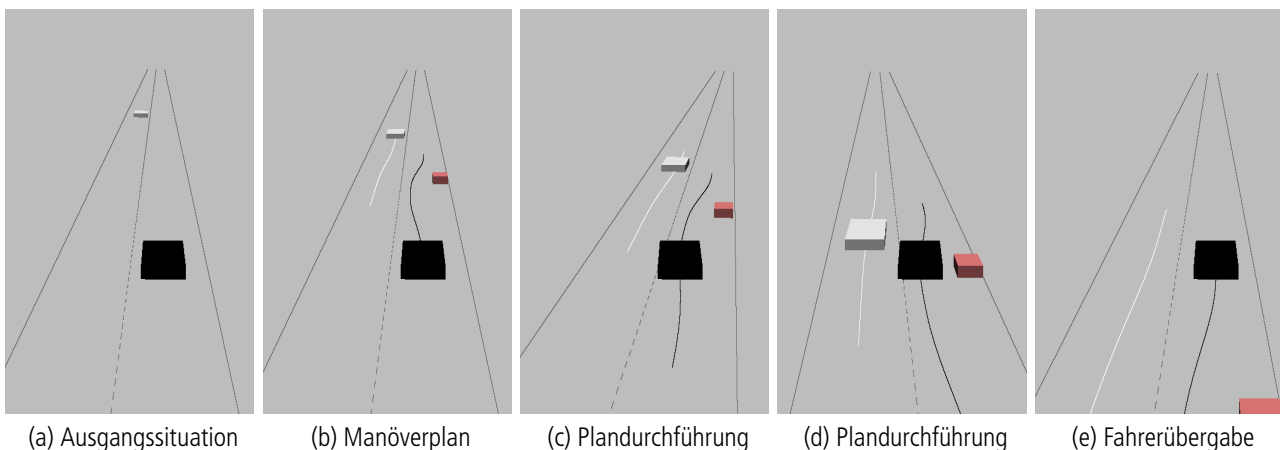


Abbildung 6.5: Unfallvermeidung beim Auftauchen eines Hindernisses in der Stadt mit zwei Fahrzeugen (F2).

Zunächst illustriert Abbildung 6.5a eine ungefährliche Szene, in der zwei Fahrzeuge auf ihren jeweiligen Fahrstreifen aufeinander zufahren. In Abbildung 6.5b erscheint dann plötzlich ein Hindernis, welches zum Beispiel einen Fußgänger, einen Radfahrer, oder eine sich öffnende Fahrzeurtür darstellt. Dieses Hindernis erlaubt es dem schwarzen Fahrzeug (PKW) nicht, seine Fahrt ungehindert fortzusetzen oder mittels einer Notbremsung die Kollision mit ihm zu vermeiden. Die kooperative Manöverplanung berechnet einen Plan, der vorsieht, dass das weiße Fahrzeug an seinen Fahrstreifenrand fährt, um dem schwarzen Fahrzeug ein Ausweichmanöver zu ermöglichen. Abbildung 6.5d zeigt den Moment, in dem das schwarze Fahrzeug das Hindernis gerade passiert während die Fahrerübergabe nach kollisionsfreier Bewältigung des Konflikts in Abbildung 6.5e gezeigt ist.

Die kooperative Manöverplanung hat drei Konfliktsituationen, die der Unfallvermeidung zugeordnet werden können, gelöst. Die Anforderung der **Anwendbarkeit in der Unfallvermeidung ist somit nachgewiesen**. Da die Unfallvermeidung zudem in den drei geforderten unterschiedlichen Umgebungen stattfindet, ist die **Anwendbarkeit in allen Umgebungen gezeigt**. Auch die **Planung für mehrere Fahrzeuge**, die **Verwendung von Fahrzeugen und der Umgebung als Planungsgrundlage** und die **Planung von Trajektorien für alle Teilnehmer** werden anhand der Beispiele **gezeigt**.

Um den Nachweis für die Anwendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz zu erbringen, müssen neben der bereits gezeigten Unfallvermeidung (Sicherheit) noch die Einsatzmöglichkeit im Komfort und in der Effizienz dargestellt werden. Für das komfort-adressierende Szenario wird ein komfortables Auffahren auf die Autobahn und für das effizienz-adressierende Szenario ein Fahrstreifenwechsel eines LKW-Platoons gewählt.

Das komfortable Auffahren auf die Autobahn ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

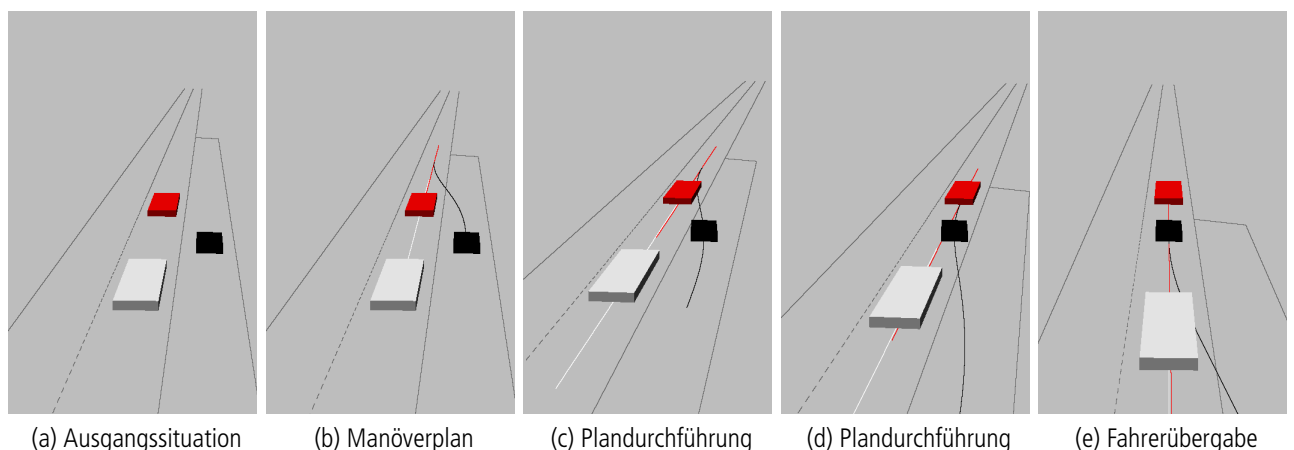


Abbildung 6.6: Komfortables Auffahren auf die Autobahn in Anwesenheit zweier LKW (A3K).

Zwei LKW (weißes und rotes Fahrzeug) befinden sich auf dem rechten Fahrstreifen einer Autobahn, während ein PKW (schwarzes Fahrzeug) auf diese aufzufahren plant (Abbildung 6.6a). Die kooperative Manöverplanung errechnet, wie in Abbildung 6.6b zu sehen, einen Plan, der die beiden LKW auf dem rechten Fahrstreifen belässt, während das schwarze Fahrzeug zwischen den beiden LKW einfädelt. Abbildung 6.6c zeigt einen Moment des Fahrstreifenwechsels des PKW auf den rechten Fahrstreifen. Abbildung 6.6d zeigt, dass das weiße Fahrzeug, also das hintere, das Manöver des schwarzen Fahrzeugs durch eine Bremsung unterstützt, da sich der Abstand zwischen dem weißen und schwarzen Fahrzeug vergrößert hat. Die Fahrerübergabe in Abbildung 6.6e erfolgt, nachdem sich alle Fahrzeuge auf der Autobahn befinden und keine Gefahr mehr zu erwarten ist.

Der Fahrstreifenwechsel eines LKW-Platoons auf der Landstraße ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Das Platoon fährt auf einer Auffahrt auf eine Bundesstraße oder kommt an ein Fahrstreifenende, wie in Abbildung 6.7a gezeigt. Dieser Fahrstreifenwechsel wird somit notwendig und wird koordiniert im Platoon durchgeführt. Dazu illustriert Abbildung 6.7b das Ergebnis der kooperativen Manöverplanung als drei Trajektorien, die auf den

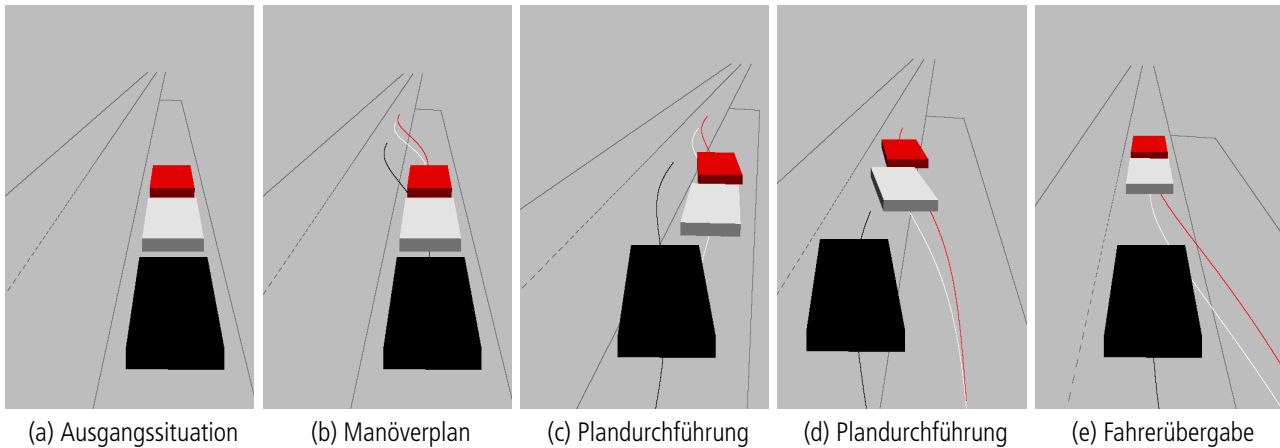


Abbildung 6.7: Platoon-Fahrstreifenwechsel mit drei LKW auf einer Landstraße (P3).

rechten Fahrstreifen der Landstraße führen. Die Abbildungen 6.7c und 6.7d zeigen die Plandurchführung, wobei gerade in Abbildung 6.7d auffällt, dass das schwarze Fahrzeug den Anschluss zu den vorausfahrenden Fahrzeugen verliert. Diese Tatsache ist dem Umstand geschuldet, dass Kostenterme zur Abbildung des Nutzens des Fahrens im Platoon fehlen, die zur verbesserten Planauswahl hinzugenommen werden müssen. Abbildung 6.7e zeigt das Ende des durchgeführten Fahrstreifenwechsels und die Übergabe an den Fahrer oder eine andere Automation des Platoonfahrens.

Die kooperative Manöverplanung löst Situationen der Sicherheit, des Komforts und der Effizienz. **Die Anwendbarkeit für Sicherheit, Komfort und Effizienz** und **Anwendbarkeit für straßengebundene Fahrzeuge** ist damit **gezeigt**.

Der Nachweis der Berücksichtigung von Fahrzeugfähigkeiten und Fahrerpräferenzen sowie der nicht entkoppelten Berechnung wird durch ein Szenario des komfortablen Autobahnauffahrens erbracht. Zur Darstellung der Berücksichtigung der Fahrzeugfähigkeiten wird ein Fahrzeug in seinen technischen Fähigkeiten beschränkt und der daraus resultierende *beschränkte Manöverplan* berechnet (Abbildung 6.8). Die Beschränkung sieht vor, dass der hinten fahrende LKW (das weiße Fahrzeug) nur ein eingeschränktes Bremsmanöver durchführen kann. Außerdem wird zur Illustration der Auswirkung unterschiedlicher Fahrerpräferenzen das unbeschränkte Szenario aus Abbildung 6.6 mit einer anders parametrisierten Kostenfunktion gelöst (Abbildung 6.9). Beide Beispiele zei-

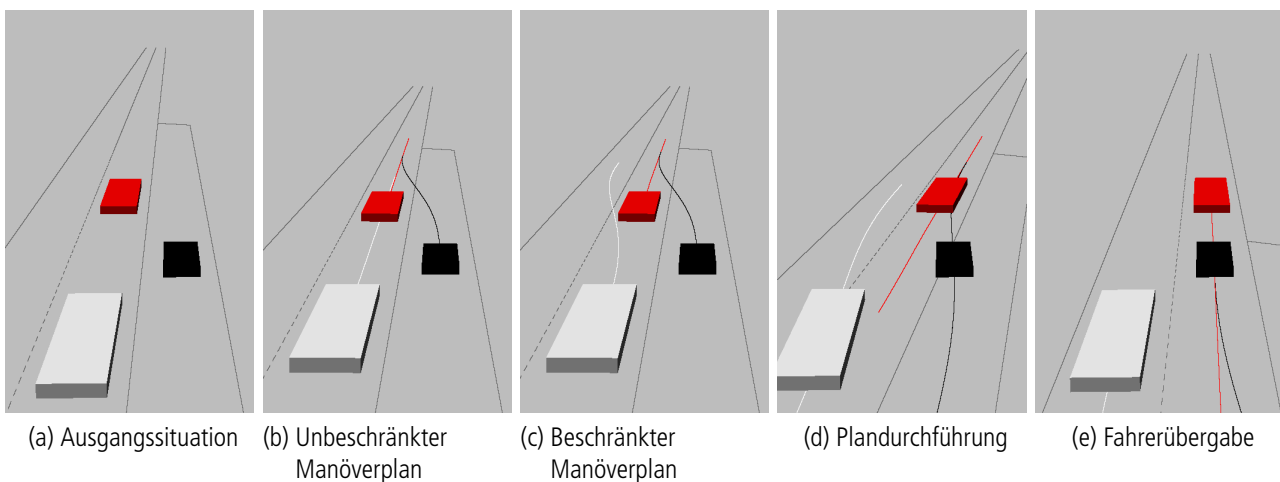


Abbildung 6.8: Einfluss der Fahrzeugfähigkeiten auf den Plan (A3K).

gen, dass die Berechnungen nicht auf Basis einer Entkoppelung stattfinden, sondern der diskretisierte, gesamte Handlungsraum untersucht wird und Lösungen entsprechend der aktuellen Einstellungen gewählt werden.

Die Abbildungen 6.8a und 6.8b illustrieren die Ausgangssituation und die Auflösung durch die Manöverplanung bei unbeschränkten Fahrzeugeigenschaften. Die Beschränkung des Bremsvermögens von  $-5,5 \frac{m}{s^2}$  auf  $-1,5 \frac{m}{s^2}$  des weißen Fahrzeugs sorgt für die Berechnung und Auswahl anderer Pläne, wobei der beste Plan in Abbildung 6.8c dargestellt ist. Der hinten fahrende LKW wechselt den Fahrstreifen, da er mit seiner begrenzten Verzögerungsfähigkeit dem auffahrenden Fahrzeug nicht genug Platz schaffen kann. Die Plandurchführung des als beschränkter Manöverplan bezeichneten Plans ist in Abbildung 6.8d gezeigt. Die Fahrerübergabe findet im sicheren Zustand statt, der in Abbildung 6.8e dargestellt ist.

Auch unterschiedliche Fahrerpräferenzen führen zur Auswahl anderer Pläne. Abbildung 6.9 zeigt die Lösung des komfortablen Auffahrens auf die Autobahn mit vier unterschiedlich parametrisierten Kostenfunktionen.

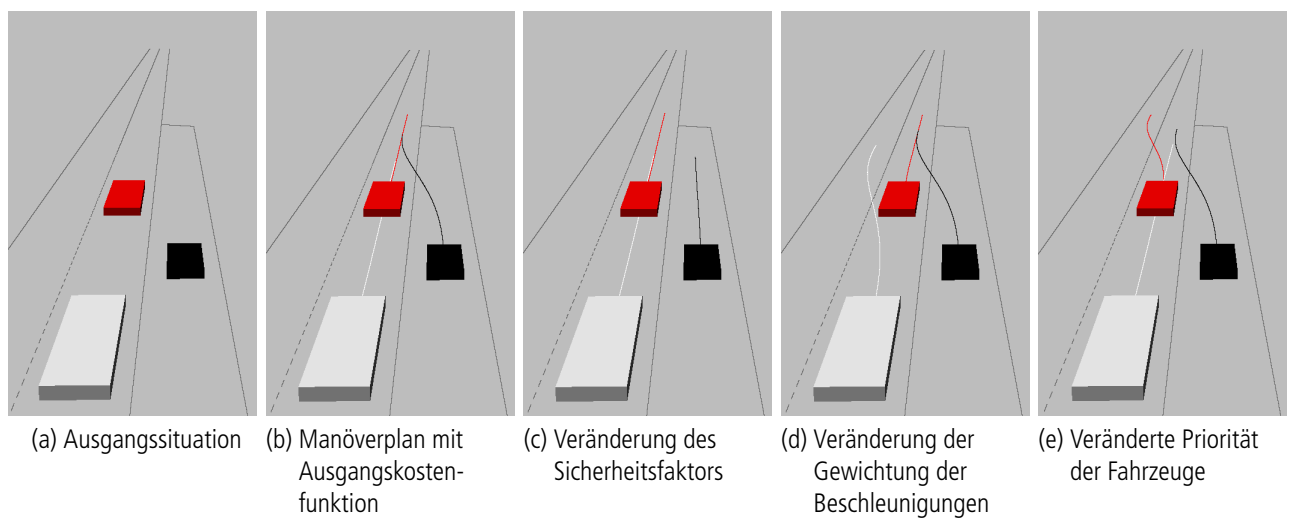


Abbildung 6.9: Einfluss der Fahrerpräferenzen auf den Plan (A3K).

Abbildungen 6.9a und 6.9b zeigen die Ausgangssituation und den besten Plan, der durch die im Anhang parametrisierte Kostenfunktion ermittelt wird. Durch Veränderung der Parameter der Kostenfunktion können nun andere Pläne als die besten identifiziert werden. Eine Veränderung der Zugehörigkeitsfaktoren der Fuzzy-Funktion des Sicherheitsfaktors von gering / mittel / hoch (1 / 1,5 / 3) zu (1 / 3 / 6) führt dazu, dass das Einfädelmanöver als zu kritisch beurteilt wird und das schwarze Fahrzeug auf dem Beschleunigungsstreifen abbremst, siehe Abbildung 6.9c. Die Lösung ist nach der Kostenfunktion zwar die optimale, hilft dem schwarzen Fahrzeug jedoch nicht, sein Ziel zu erreichen. Um die Zielerreichung aller Teilnehmer sicherzustellen, müssen weitere Kostenterme oder harte Randbedingungen eingeführt und berücksichtigt werden. Eine Verschiebung der Gewichtung der Kosten, die durch Längsbeschleunigung und Querschleunigung erzeugt werden, verändert den besten Plan ebenfalls. Bei einer Veränderung der Gewichtung von Längs- zu Querschleunigung mittels der Einstellungen des Fahrkomforts von ursprünglich 1:2 zu 10:1 wird der in Abbildung 6.9d gezeigte Plan als bester bewertet, da das Bremsen des weißen Fahrzeugs schlechter bewertet wird als ein Fahrstreifenwechsel. Bei einer Veränderung der Prioritäten der Fahrzeuge, in diesem Fall zählen die Kosten des schwarzen Fahrzeugs doppelt, räumt das rote Fahrzeug den rechten Fahrstreifen, um dem schwarzen Fahrzeug ein kosteneffizientes Auffahren zu ermöglichen, wie in Abbildung 6.9e gezeigt.

Die kooperative Manöverplanung schlägt Pläne auf Basis der Fahrzeugeigenschaften und der Fahrerpräferenzen vor. Ändern sich die Eigenschaften oder Präferenzen, so ändern sich auch die Berechnung oder die Auswahl der Pläne. **Der Nachweis der Berücksichtigung der Fahrzeugeigenschaften und Fahrerpräferenzen ist demnach erbracht.** Auch die **nicht entkoppelte Berechnung ist gezeigt.** Eine durch die nicht entkoppelte

Berechnung der Pläne auftretende Herausforderung besteht in der Komplexität, die das Verfahren zu bewältigen hat. Diese kann durch die Wahl einer geeigneten Parametrierung reduziert werden, die einen Kompromiss zwischen Rechenzeit und Vollständigkeit der Lösung darstellt.

Die aus diesem Vorgehen entstehende Komplexität ist durch die Wahl einer geeigneten Parametrierung (Diskretisierung) zu reduzieren. Das Verfahren weist eine exponentielle Komplexität auf, welche für eine steigende Anzahl von Fahrzeugen oder zu planenden Objekten eine Herausforderung darstellt. Nachstehend wird die Sensitivität der Methode auf unterschiedliche Diskretisierungen der Parameter Zielpunktdichte in x- und y-Richtung, die Anzahl der Gitterpunkte in x- und y-Richtung, die Anzahl der Teilmanöver und die Manöverdauer untersucht. Wie Voruntersuchungen gezeigt haben, hat die gewählte Parametrierung großen Einfluss auf das Erzeugen von Lösungen in einer spezifischen Situation [58]. Anhand dreier sicherheitskritischer Szenarien (A3S, Ü3, F2) soll untersucht werden, wie sensitiv die Methode reagiert. Dazu werden die Parameter in den gleichen Grenzen wie in der bereits durchgeführten Voruntersuchung variiert. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass sehr kleine Manöverdauern keine Lösungen hervorbringen, da eine gewisse Zeit zum Fahrstreifenwechsel oder zum Räumen eines Bereichs notwendig ist. Entsprechend der Erkenntnisse der Voruntersuchungen wird die Manöverdauer mit einem unteren Wert von 1,8 s angenommen, welcher in Schritten von 0,1 s bis zu einer maximalen Manöverdauer von 2,2 s erhöht wird. Die Manöverdauer könnte, wenn nötig, auch weiter erhöht werden, wird aus Gründen der Berechnungszeit jedoch auf 2,2 s begrenzt. Somit ergeben sich die in Tabelle 6.4 gezeigten Minimalwerte, Maximalwerte und Schrittweiten der Parametervariation. Insgesamt werden 86.400 (28.800 Simulationen pro Szenario) durchgeführt.

Tabelle 6.4: Untersuchungsbereiche zur Erstellung von Parametersätzen.

Untersuchter Parameter	Minimalwert	Maximalwert	Schrittweite
Zielpunktdichte in x-Richtung $\left[\frac{ZP_x}{m}\right]$	0,5	3	0,5
Zielpunktdichte in y-Richtung $\left[\frac{ZP_y}{m}\right]$	0,5	3	0,5
Anzahl Gitterpunkte in x-Richtung $[GP_x]$	1	8	1
Anzahl Gitterpunkte in y-Richtung $[GP_y]$	4	8	1
Anzahl Teilmanöver	1	4	1
Manöverdauer [s]	1,8	2,2	0,1
Untersuchungen pro Situation	28.800		

Die Analyse der 86.400 Simulationen ergibt, dass das erfolgreiche Auflösen der Situationen maßgeblich von den beiden Größen Manöverdauer und Zielpunktdichte abhängt. Nur in wenigen Ausnahmen wird kein Plan wegen der Begrenzung der Teilmanöver gefunden.

Hinsichtlich der Manöverdauer kann für die Verwendung in Sicherheitsfunktionen von einem unteren Schwellwert der Manöverdauer ausgehend iterativ eine Lösung gesucht werden. Wenn keine Lösung gefunden wurde, so wird die Manöverdauer erhöht und neuerlich nach einer Lösung gesucht. Die Berechnung einer unauflöslchen Situation kann im Vergleich zu der Berechnung eines Plans relativ schnell erfolgen. Je nach Parametrierung steht das Ergebnis schon nach wenigen Millisekunden fest. Durch die Untersuchungen der drei Situationen wird für die weitere Analyse ein unterer Schwellwert von  $T = 1,9$  s festgesetzt. Für die kleinere Manöverdauer von  $T = 1,8$  s können nicht alle konkreten Szenarien aufgelöst werden.

Bei der Zielpunktdichte ist die y-Richtung entscheidend für das Finden einer Lösung. Es werden nur mit einer Dichte von zwei oder drei Zielpunkten pro Meter in y-Richtung Lösungen gefunden. Neben dem in [58] festgestellten Einfluss auf die Kostenoptimalität wurde somit auch der größere Einfluss der Dichte in y-Richtung für



das Finden mindestens einer Lösung gezeigt.

Die übrigen Parameter erlauben in jeder untersuchten Zusammenstellung eine Lösung und müssen daher nicht beschränkt werden. Tabelle 6.5 hält die bisherigen Erkenntnisse der Untersuchungen fest.

Tabelle 6.5: Mögliche Parametrierungen der kooperativen Manöverplanung.

	$\frac{ZP_x}{m}$	$\frac{ZP_y}{m}$	$GP_x$	$GP_y$	TM	$T [s]$
Parametersätze	0,5 – 3	2; 3	1 – 8	4 – 8	1 – 4	1,9

Demnach sind 1.920 Parametersätze in der Lage, die drei Situationen aufzulösen. Die Berechnungszeiten der Parametersätze unterscheiden sich zum Teil deutlich. Tabelle 6.6 zeigt mit der feinsten Diskretisierung (längste Berechnungsdauer), der größten Diskretisierung (kürzeste Berechnungsdauer) und drei weiteren Parametersätzen, die unter einer Sekunde Berechnungszeit<sup>1</sup> aufweisen, insgesamt fünf Parametersätze. Das Zeitlimit von einer Sekunde ergibt sich, da davon ausgegangen werden kann, dass Teile der Berechnung des Algorithmus beispielsweise durch Auslagerungen auf Grafikprozessoren oder Feldprogrammierbare (Logik-)Gatter-Anordnungen (FPGA) beschleunigt und somit auf noch deutlich geringere Berechnungszeiten gebracht werden können. Dieses Zeitlimit wurde zudem bereits an anderer Stelle für das Berechnen von Manöverplänen gesetzt [84].

Tabelle 6.6: Fünf Parametersätze für die kooperative Manöverplanung.

	$\frac{ZP_x}{m}$	$\frac{ZP_y}{m}$	$GP_x$	$GP_y$	TM	Summe aller Pläne	maximale Berechnungszeit [s]
<i>Parametersatz 1</i>	3	2	2	7	4	160.663	0,988
<i>Parametersatz 2</i>	1	3	7	7	2	154.346	0,990
<i>Parametersatz 3</i>	1,5	2	6	8	4	222.534	0,994
<i>Parametersatz grob</i>	0,5	2	1	4	1	192	0,009
<i>Parametersatz fein</i>	3	3	8	8	4	18.112.719	43,532

Die fünf gezeigten Parametersätze werden nun auf konkrete Szenarien der drei Szenarien angewandt, deren Generierung im Anhang in Abschnitt A.9 beschrieben ist. Dabei wird der *Parametersatz fein* als Referenz verwendet. Die Referenz gibt an, wie viele der konkreten Szenarien *physikalisch* lösbar waren, also nicht durch eine zu grobe Parametrierung für den Algorithmus unlösbar waren. Es handelt sich bei der Referenz um eine Pseudoreferenz, da sie auf demselben Verfahren und somit auf denselben Einschränkungen beruht. Zur Abschätzung der Eignung der unterschiedlichen Parametersätze ist diese Tatsache jedoch nicht von Nachteil, da alle untersuchten Parametersätze denselben Bedingungen unterliegen. Die Anzahl der durch die Referenz aufgelösten konkreten Szenarien wird dann mit den anderen Parametersätzen verglichen. Zunächst werden alle zu jeder Situation gehörenden konkreten Szenarien auf die drei Parametersätze, die Pseudoreferenz und den größten Parametersatz angewandt. Anschließend werden die Ergebnisse der fünf Parametersätze für jedes Szenario einzeln und in einer Gesamtübersicht dargestellt. Ein konkretes Szenario gilt als gelöst, wenn mindestens ein Plan existiert, der unfallvermeidend ist.

<sup>1</sup>Die maximale Berechnungszeit wurde mittels eines Berechnungsdurchlaufes der drei Szenarien ermittelt. Dazu wurde ein Standard-Notebook mit einem Intel Core i5-3320M CPU mit 2,6 GHz, 8 GB RAM und dem Betriebssystem Windows 7 (64 Bit) verwendet.

Tabelle 6.7: Ergebnisse der Parametersatzuntersuchung.

Szenario		gelöste konkrete Szenarien	relativ [%]
Autobahn	<i>Parametersatz 1</i>	135.426	99,7
	<i>Parametersatz 2</i>	134.505	99,0
	<i>Parametersatz 3</i>	134.514	99,0
	<i>Parametersatz grob</i>	125.899	92,7
	<i>Parametersatz fein</i>	135.821	100
Landstraße	<i>Parametersatz 1</i>	74.947	89,9
	<i>Parametersatz 2</i>	76.694	92,0
	<i>Parametersatz 3</i>	72.205	86,6
	<i>Parametersatz grob</i>	61.042	73,2
	<i>Parametersatz fein</i>	83.352	100
Stadt	<i>Parametersatz 1</i>	106.904	97,3
	<i>Parametersatz 2</i>	101.235	92,1
	<i>Parametersatz 3</i>	107.006	97,4
	<i>Parametersatz grob</i>	90.567	82,4
	<i>Parametersatz fein</i>	109.860	100
Gesamt	<i>Parametersatz 1</i>	317.277	96,4
	<i>Parametersatz 2</i>	312.434	95,0
	<i>Parametersatz 3</i>	313.725	95,3
	<i>Parametersatz grob</i>	277.508	84,3
	<i>Parametersatz fein</i>	329.033	100

Tabelle 6.7 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen. Dabei wurden für das Autobahnszenario 210.000, für das Landstraßenszenario 211.328 und für das Stadtszenario 116.235 konkrete Szenarien untersucht. Die Anzahl der gelösten konkreten Szenarien ist für jeden Parametersatz und jedes Szenario gezeigt. Der relative Wert wird für die Referenz als 100 % berechnet. Für die anderen Parametersätze ergibt sich der relative Wert als Quotient der Anzahl der gelösten konkreten Szenarien bezogen auf die von der Referenz gelösten konkreten Szenarien. Das Autobahnszenario wird von *Parametersatz 1*, das Landstraßenszenario von *Parametersatz 2* und das Stadtszenario von *Parametersatz 3* am besten gelöst. In der Gesamtübersicht zeigt sich, dass *Parametersatz 1* (96,4 %) vor *Parametersatz 3* (95,3 %) und *Parametersatz 2* (95,0 %) das beste Ergebnis zeigt. Auch *Parametersatz grob* löst mit 84,3 % durchschnittlich mehr als fünf von sechs konkreten Szenarien.

Durch die **nicht entkoppelte Berechnung** wird **eine Komplexität der Berechnung erzeugt**, die **abhängig von der Diskretisierung/Parametrierung der kooperativen Manöverplanung ist**. Neben der unterschiedlichen Berechnungszeit von Plänen kommt es bei unterschiedlicher Parametrierung situationsabhängig zu keiner Lösung, obwohl diese *technisch* möglich sind. Um die Wahrscheinlichkeit der Lösungsfindung zu maximieren, sollte eine hinreichend feine Diskretisierung eingestellt werden. Die Komplexität ist durch die Parametrierung beherrschbar. Es bleibt zu klären, welche Parametrierung geeignet ist, um ein Gros der Konfliktsituationen aufzulösen. Dazu zählt auch die Manöverdauer, die entscheidenden Einfluss auf die Lösung einer Situation hat. Ein vorgeschalteter Algorithmus könnte eine Abschätzung über die Parametrierung vornehmen, um die Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen Konfliktbewältigung weiter zu erhöhen.

Dass die kooperative Manöverplanung sichere Trajektorien und sichere Endzustände plant, wird im Folgenden

durch die Verwendung des SiL- und des HiL-Verfahrens gezeigt. Die beiden Simulationsumgebungen verwenden unterschiedliche Modelle der Planbefolgung. Dadurch unterscheiden sich die geplanten von den befolgten Trajektorien sowie die geplanten von den erreichten Endzuständen. Dafür wird eine Situation in der Stadt untersucht, bei dem sich die Fahrzeurtür eines geparkten Fahrzeugs öffnet.

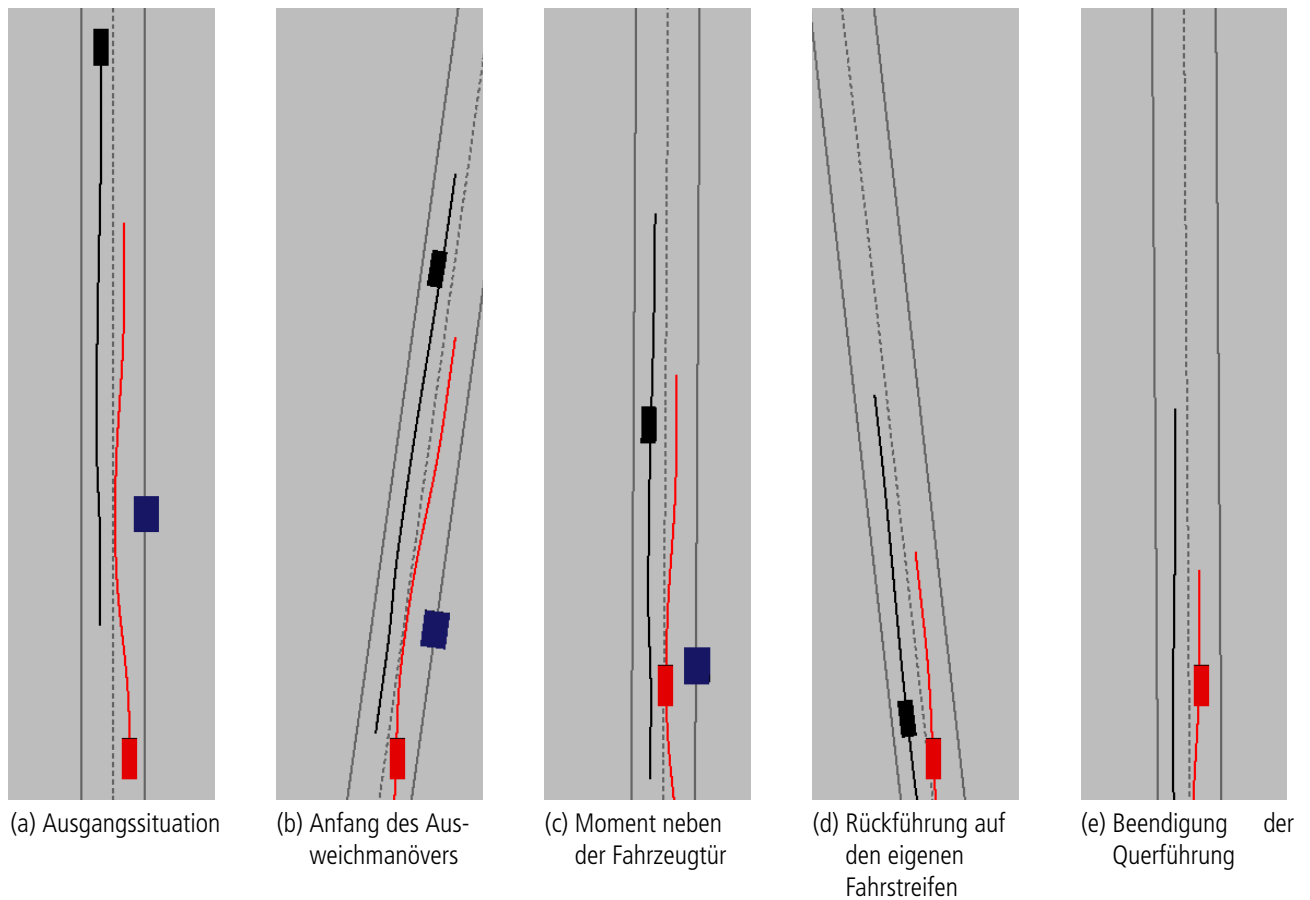
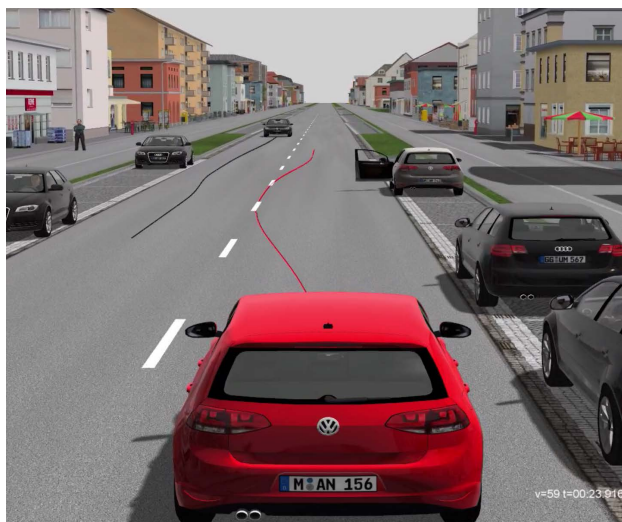


Abbildung 6.10: Befolgen der sicheren Trajektorien und Erreichen der sicheren Endzustände im SiL-Verfahren (T2).

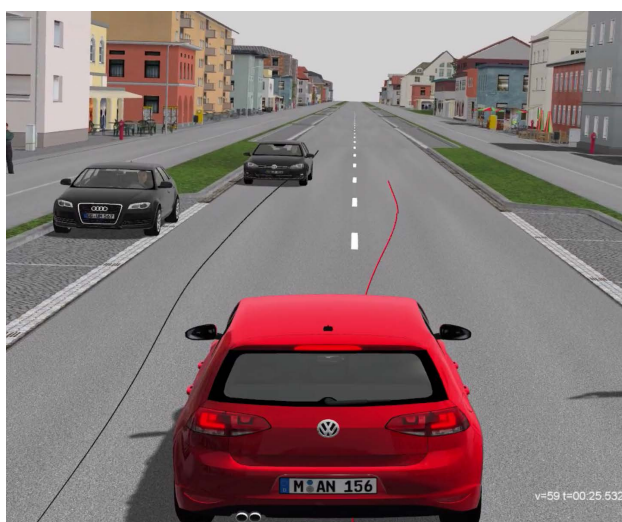
Die Abbildungen 6.10 und 6.11 zeigen die Situation mit der sich plötzlich öffnenden Tür in fünf Schritten im SiL- und HiL-Verfahren. Die Abbildungen 6.10a und 6.11a stellen die Ausgangssituation und den berechneten Plan dar. Der Plan sieht vor, dass das schwarze Fahrzeug an den Straßenrand fährt, um dem roten Fahrzeug das Ausweichen in den Gegenverkehr zu ermöglichen. Die Abbildungen 6.10b und 6.11b veranschaulichen einen Moment, in dem das rote Fahrzeug in Richtung des Gegenfahrstreifens lenkt. Die Darstellung der Bremslichter im HiL-Verfahren zeigt, dass das rote Fahrzeug neben einem Lenkeingriff auch verzögert. Da im HiL-Verfahren erstmals ein Fahrzeugmodell für das Nachfahren der Trajektorien genutzt wird, sind Abweichungen zwischen der geplanten und der tatsächlich gefahrenen Trajektorie zu erwarten. Die Abweichungen werden sowohl in der HiL-Simulation als auch in der Darstellung des SiL-Verfahrens angezeigt. Zu diesem Zeitpunkt sind die Abweichungen für das rote Fahrzeug relativ gering. Dementgegen weist das schwarze Fahrzeug in Abbildung 6.10b eine relativ große Abweichung zur geplanten Trajektorie auf. Die Trajektorien geben an, wie sich der geometrische Mittelpunkt des Fahrzeugs bewegen sollte. Da die Trajektorie neben den räumlichen Komponenten auch zeitabhängig ist, können die Bewertungen der geometrischen Trajektorienbefolgung jedoch nur einen Anhaltspunkt für die gesamtheitliche Befolgung liefern. Beim schwarzen Fahrzeug ist demnach eine deutliche räumliche Verschiebung zu erkennen. In den Abbildungen 6.10c und 6.11c ist der Moment dargestellt, in dem das rote Fahrzeug die sich öffnende Fahrzeurtür passiert. Gerade in Abbildung 6.11c ist eine Abweichung der Momentanposition des roten Fahrzeugs zur geplanten Position ersichtlich: Das Fahrzeug befindet sich weiter auf dem Gegenfahrstreifen als geplant. Die Abweichung ist jedoch so gering, dass einerseits die Tür auf der rechten Seite



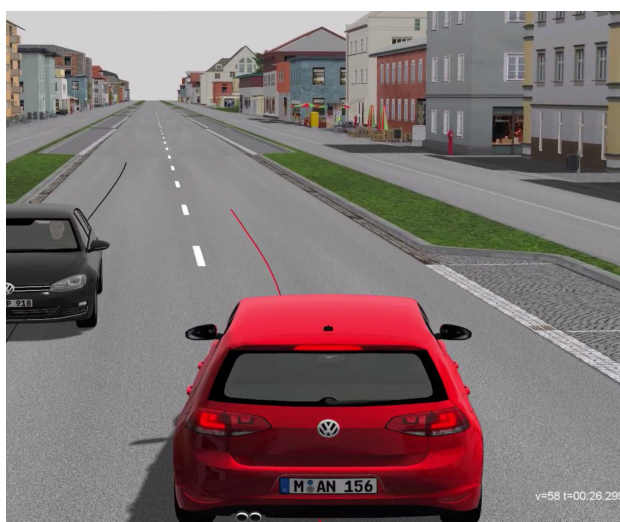
(a) Ausgangssituation



(b) Anfang des Ausweichmanövers



(c) Moment neben der Fahrzeugtür



(d) Rückführung auf den eigenen Fahrstreifen



(e) Beendigung der Querführung

Abbildung 6.11: Befolgen der sicheren Trajektorien und Erreichen der sicheren Endzustände im HiL-Verfahren (T2).

des roten Fahrzeugs sicher umfahren werden kann und andererseits von keiner Kollision mit dem schwarzen Fahrzeug ausgegangen werden muss. Unterdessen ist die Abweichung der Position vom schwarzen Fahrzeug wieder geringer geworden. Die Abbildungen 6.10d und 6.11d zeigen die Vorbeifahrt der beiden Fahrzeuge, die ohne Kollision durchgeführt wird. Die Abweichungen scheinen wieder geringer geworden zu sein, sodass die Fahrzeuge sich zu diesem Zeitpunkt nahezu wie geplant bewegen. Obgleich die Vorbeifahrt der Fahrzeuge in der Vogelperspektive des SiL-Verfahrens sehr eng erscheint, lässt die Darstellung des HiL-Verfahrens ein durchaus komfortableres Passieren vermuten. Schließlich ist in den Abbildungen 6.10e und 6.11e die Rückführung des roten Fahrzeugs in den eigenen Fahrstreifen gezeigt. Gleiches gilt natürlich auch für das in diesem Ausschnitt nicht gezeigte schwarze Fahrzeug. Die Endposition des Fahrzeugs ist ein wenig näher zum Mittelstreifen als geplant, was in dieser Situation durch die Einbeziehung von genügend großen Sicherheitsabständen jedoch keinesfalls ein höheres Risiko oder gar das Anfahren von unsicheren Endzuständen bedeutet.

**Es wurde demonstriert, dass sichere Endzustände und sichere Trajektorien die Planungsgrundlage darstellen.** Die kooperative Manöverplanung basiert auf der Planung von Trajektorien zu einem sicheren Endzustand. Es wird überprüft, ob die Trajektorien und Endzustände kollisionsfrei und die Fahrzeuge die ganze Zeit auf der Straße verbleiben. Im HiL-Verfahren zeigt sich, dass der durchgeführte Plan eine sichere Bewältigung der Situation erlaubt. Obwohl die Endzustände und die Trajektorien dorthin mit einem relativ rudimentären Modell geplant sind, halten sich die Abweichungen augenscheinlich in Grenzen. Die Abweichungen sind dabei stark abhängig von Werten wie beispielsweise der Geschwindigkeit und der aufzubringenden Querbeschleunigung. In dem Beispiel zeigt sich, dass die sicher geplanten Endzustände und Trajektorien durch die Verwendung eines Fahrzeugmodells nicht exakt erreicht bzw. nachgefahren werden können. Somit könnte es trotz der sicheren Planung zu unsicheren Endzuständen und Kollisionen kommen. Vor allem wenn die Randbedingungen der Planung nicht eingehalten werden, können große Abweichungen entstehen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn das Fahrzeug im Startpunkt eine Fahrzeugausrichtung aufweist, die stark von der geforderten Ausrichtung abweicht. Neben der Erweiterung der Systemgrenzen durch bessere Planungsmodelle könnte die sichere Befolgung der Pläne auch durch die Erhöhung der Sicherheitsfaktoren erreicht werden. Weiterhin ist es möglich, Abweichungen schon bei der Planung zu berücksichtigen und dafür zu sorgen, dass der Fahrzeugregler eine bessere Befolgung erzielt. Schließlich wird, wie in Kapitel 4 beschrieben, die Entwicklung eines Überwachungsmoduls empfohlen, welches die Abschätzung von Planabweichungen vornimmt und die Durchführung bei Überschreitung einer Kritikalitätsgrenze unterbricht. Ein solches Modul ist beispielsweise in [14] beschrieben.

Den gezeigten Szenarien liegt die Annahme zugrunde, dass alle Fahrzeuge mit dem fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem ausgestattet sind. In Anwesenheit von nicht mit diesem System ausgestatteten Fahrzeugen, was gerade in der Übergangsphase hin zur Vollausstattung häufig der Fall sein wird, müssen nicht beeinflussbare Teilnehmer ebenfalls berücksichtigt werden können. Abbildung 6.12 stellt eine Überholsituation mit einem nicht beeinflussbaren Teilnehmer und unterschiedlichen Lösungsoptionen dar.

Abbildung 6.12a zeigt eine Situation, in der ein PKW (gelbes Fahrzeug) einen anderen PKW (weißes Fahrzeug) trotz Gegenverkehrs überholt. Das weiße Fahrzeug ist deutlich langsamer als das gelbe. Wie die Situation konfliktfrei aufgelöst werden kann, wird in den anderen drei Abbildungen gezeigt. Abbildung 6.12b zeigt die Lösung, die von der kooperativen Manöverplanung unter der Annahme der Vollausstattung berechnet wird. Das gelbe Fahrzeug setzt das Überholmanöver fort, während das weiße und rote Fahrzeug durch die Bewegung zum jeweiligen rechten Straßenrand Platz machen. Die Kosten für diesen Plan betragen 0,956.

Für den Fall, dass keine Vollausstattung mit dem System vorliegt, ist die Auflösung der Situation abhängig von der Trajektorie, die der nicht beeinflussbare Teilnehmer fahren wird. In den nachfolgenden zwei Berechnungen ist das gelbe Fahrzeug ein nicht beeinflussbarer Teilnehmer. Die Trajektorie für das gelbe Fahrzeug kann in einem solchen Fall durch ein Prädiktionsmodell geschätzt werden. Beispielhaft werden in den Abbildungen 6.12c und 6.12d Lösungen gezeigt. Der Lösung in Abbildung 6.12c liegt die konservative Annahme der gleichförmigen

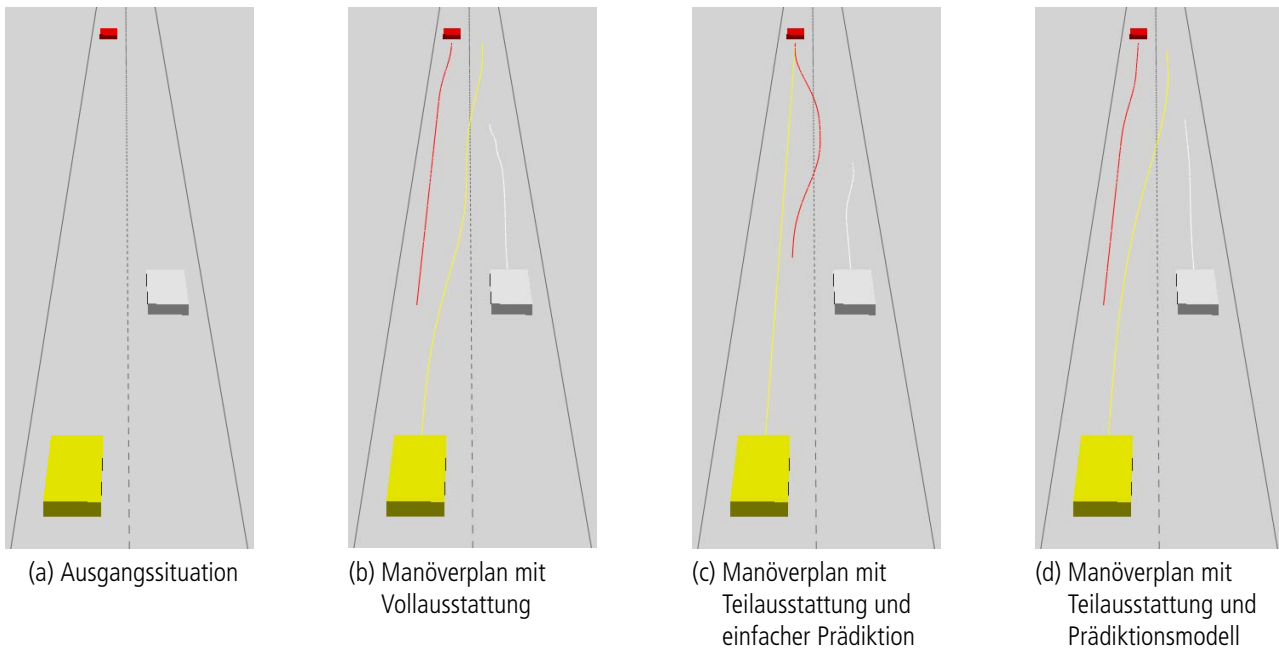


Abbildung 6.12: Gefahrensituation zur Verdeutlichung des Umgangs mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern (Ü3). In den gezeigten Fällen ist das gelbe Fahrzeug nicht beeinflussbar.

gen Weiterbewegung des nicht beeinflussbaren Teilnehmers zugrunde, die in vielen getesteten Situationen zu plausiblen Ergebnissen geführt hat. In dieser Situation bewirkt sie, dass das rote Fahrzeug dem gelben Fahrzeug auf den Gegenfahrstreifen ausweicht, um vor dem weißen Fahrzeug wieder auf seinen Fahrstreifen zurückzufahren. Das weiße Fahrzeug bremst stark ab und fährt an den rechten Rand der Straße. Der Plan ist kollisionsfrei und endet für die geplanten Fahrzeuge in sicheren Endzuständen. Die Kosten für diese Lösung betragen 2,534. Fraglich ist jedoch, ob dieses Verhalten eine realistische Annahme für das gelbe Fahrzeug ist, da das Verhalten in vergleichbaren Situationen erfahrungsgemäß anders aussieht.

Neben einer bloßen Annahme kann auch ein geeignetes Prädiktionsmodell zur Vorhersage der Trajektorie herangezogen werden. Exemplarisch wird das in [13] vorgestellte Modell verwendet. Es prädiziert, dass das gelbe Fahrzeug seinen Überholvorgang abschließt. Die kooperative Manöverplanung nimmt diese Trajektorie als Planungsgrundlage und errechnet den Plan mit ihr. Der Plan sieht vor, dass die anderen beiden Fahrzeuge das gelbe Fahrzeug in seinem Vorhaben unterstützen. Die Kosten für diesen Manöverplan betragen 1,252.

Beim Vergleich der Lösungen und deren Kosten fällt auf, dass der Manöverplan mit der Annahme der Vollausstattung die kleinsten Kosten erzeugt, der Manöverplan mit dem Prädiktionsmodell mittlere Kosten nach sich zieht und der Manöverplan mit der gleichförmigen Bewegung die höchsten Kosten entstehen lässt. Die Manöverplanung kann mit eingespeisten Trajektorien umgehen und errechnet, je nach Güte des Prädiktionsmodells, bestmögliche Pläne zur Kollisionsvermeidung auch mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern.

Für die Übergangsphase auf dem Weg zur Vollausstattung mit der kooperativen Manöverplanung müssen nicht beeinflussbare Teilnehmer berücksichtigt werden können. Mittels eines Beispiels unter der Verwendung von zwei unterschiedlichen Prädiktionen wurde gezeigt, dass die **Berücksichtigung von nicht beeinflussbaren Teilnehmern** innerhalb der kooperativen Manöverplanung möglich ist. Dabei ist anzumerken, dass die Güte der Pläne mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern stark von der Qualität der Prädiktion des prädizierten Teilnehmers abhängig ist. Daher sind die prädizierten Trajektorien situativ auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen. Das Prädiktionsmodell ist nicht Teil der kooperativen Manöverplanung und kann beispielsweise entsprechend der Anzahl der Beteiligten oder passend zum Umfeld der Literatur entnommen und eingesetzt werden.



### 6.2.3 Vergleich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik

Die Methoden des elastischen Bands, der gerichteten Graphen und des Optimalsteuerungsproblems aus [84] haben sich im Anforderungsabgleich in Abschnitt 2.4.3 des Stands der Wissenschaft und Technik als ebenfalls gut geeignete Methoden zur Planung kooperativer Fahrmanöver gezeigt. Eine vom Autor durchgeführte Gegenüberstellung der Methoden hat gezeigt, dass die Planung kooperativer Manöver mit dem Optimalsteuerungsproblem starken Schwankungen hinsichtlich der Berechnungszeit unterliegt und deshalb im Vergleich mit den anderen Methoden weniger geeignet ist [84]. Daher wird die kooperative Manöverplanung mit der Methode der gerichteten Graphen und des elastischen Bands verglichen, indem sie in Beispielsituationen zur Anwendung kommen. Als Beispielsituationen werden Situationen aus der Sicherheit gewählt, da die beiden aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bekannten Planer ausschließlich für sicherheitsrelevante Szenarien entwickelt wurden. Weiterhin beinhalten die Situationen nur gerade Abschnitte, da die kooperative Manöverplanung in der aktuellen Umsetzung keine Kurven oder Abbiegevorgänge in Kreuzungen berücksichtigen kann. Somit wird als Situation ein sicherheitskritischer Überholvorgang gewählt, der in unterschiedlichen Konstellationen von den Planern gelöst werden soll.

Die Konfliktsituation besteht aus einem Fahrzeug, welches auf der Landstraße einen langsamer fahrenden LKW überholt, obwohl sich Gegenverkehr nähert. Die Abbildungen 6.13, 6.14 und 6.15 zeigen die Ergebnisse der Planungen der unterschiedlichen Methoden. Der Planungshorizont beträgt für alle Planungsmethoden 2,6 s.

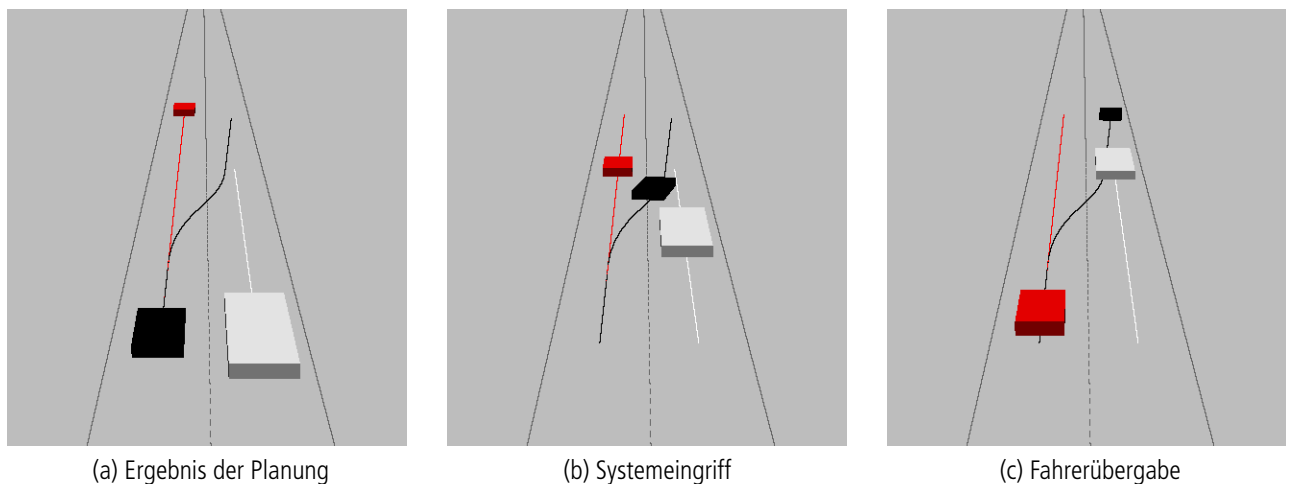


Abbildung 6.13: Planung der Konfliktsituation mit der Methode der gerichteten Graphen.

Das Ergebnis der Methode der gerichteten Graphen ist in Abbildung 6.13a gezeigt. Der berechnete Plan sieht vor, dass das rote und das weiße Fahrzeug auf ihren Fahrstreifen verbleiben und das schwarze Fahrzeug vor dem weißen Fahrzeug den Fahrstreifen wechselt. Um diesen Plan umzusetzen, fährt das schwarze Fahrzeug für eine gewisse Zeit weiter geradeaus und vergrößert somit den Abstand zum weißen Fahrzeug. Abbildung 6.13b zeigt den Moment, in dem das schwarze Fahrzeug zum Fahrstreifenwechsel ansetzt und zwischen dem weißen und dem roten Fahrzeug hindurchfährt. In Abbildung 6.13c ist der Moment der Fahrerübergabe dargestellt, nachdem die Konfliktsituation aufgelöst wurde.

Die elastische Band-Methode erzeugt den in Abbildung 6.14a dargestellten Plan. Auch in diesem Plan wird das Überholmanöver zu Ende geführt und das schwarze Fahrzeug vor dem weißen Fahrzeug auf den rechten Fahrstreifen zurückgeführt. Dazu werden das rote und das weiße Fahrzeug angewiesen, Fahrmanöver innerhalb ihrer Fahrstreifen durchzuführen. Abbildung 6.14b zeigt den Moment des Fahrstreifenwechsels, in dem der Abstand zwischen dem weißen und roten Fahrzeug am geringsten ist. Schließlich endet der Plan in Abbildung 6.14c mit der Fahrerübergabe.

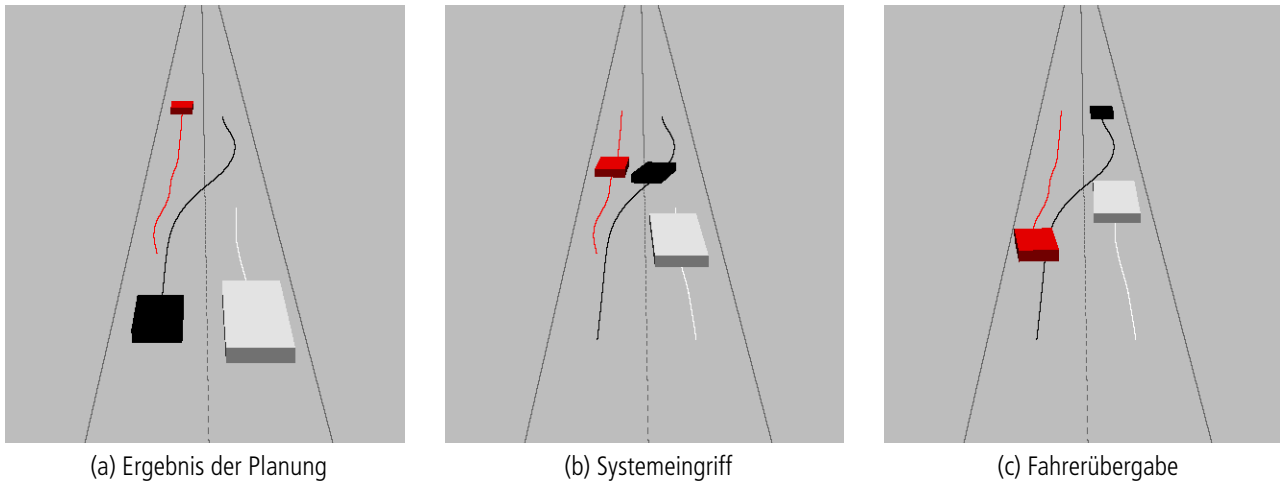


Abbildung 6.14: Planung der Konfliktsituation mit der Methode der elastischen Bänder.

Auch die kooperative Manöverplanung ist in der Lage, diese Konfliktsituation aufzulösen. Abbildung 6.15a zeigt, dass das schwarze Fahrzeug das Überholmanöver zu Ende führt und die beiden anderen Fahrzeuge auf ihren Fahrstreifen verbleiben. Beide Fahrzeuge bremsen, um die Lücke, durch die das schwarze Fahrzeug scheren soll, zu vergrößern. Dieses kollisionsfreie Durchscheren ist in Abbildung 6.15b dargestellt. Abbildung 6.15c zeigt den Moment der Fahrerübergabe, nachdem die Konfliktsituation kooperativ aufgelöst wurde.

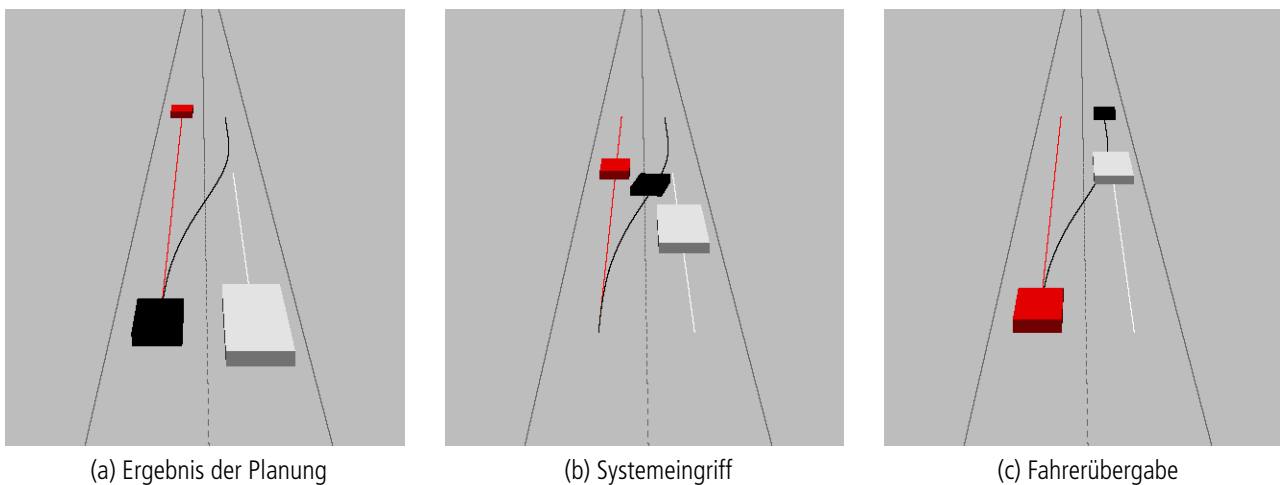


Abbildung 6.15: Planung der Konfliktsituation mit der kooperativen Manöverplanung.

Beim Vergleich der Methoden fällt auf, dass von allen dieselbe Strategie errechnet wurde. Die Methode der gerichteten Graphen und die kooperative Manöverplanung erzielten dabei ein sehr ähnliches Ergebnis. Einzig die Fahrzeugausrichtung im Endzustand des schwarzen Fahrzeugs unterscheidet sich dahingehend, dass die kooperative Manöverplanung nur parallel zur Straße ausgerichtete, sichere Endzustände zulässt. Verglichen mit der Methode des elastischen Bands fällt auf, dass zwar die gleiche Strategie gewählt, aber eine andere Umsetzung dieser errechnet wurde. Das schwarze und rote Fahrzeug fahren länger aufeinander zu und weichen erst relativ spät voneinander aus. Dies kann dem Umstand geschuldet sein, dass die Methode des elastischen Bands eine Startschätzung benötigt und diese kein schnelleres Ausweichen ermöglicht. Es kann sich um ein lokales Minimum handeln, dessen Existenz die Lösungen der kooperativen Manöverplanung nicht beeinflusst. Auch hier zeigt sich die nicht zum Fahrbahnrand parallele Fahrzeugausrichtung des roten Fahrzeugs. Es bleibt festzuhalten, dass sich alle drei Methoden grundsätzlich eignen, diese Situation aufzulösen und für kooperativ geplante Manöver verwendet werden können.



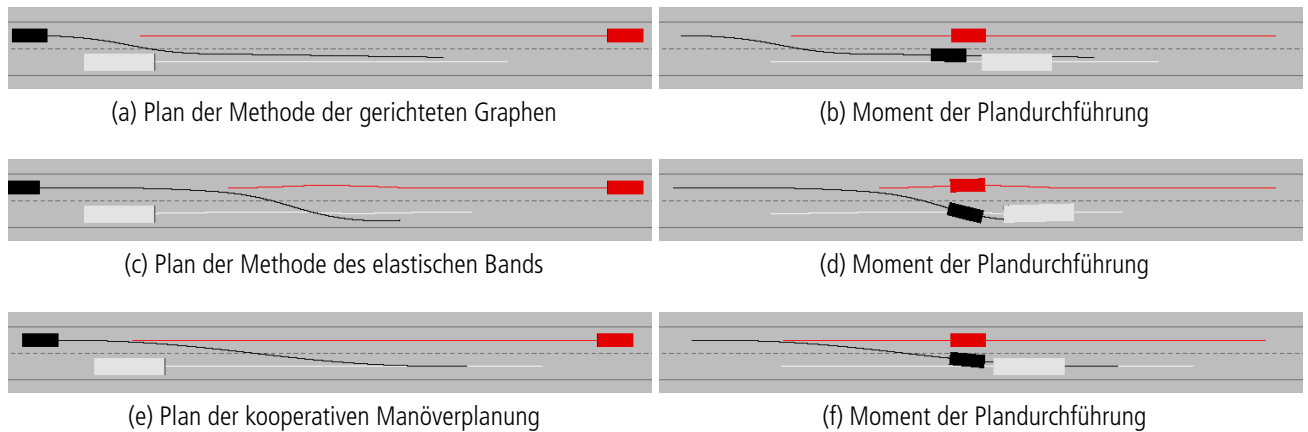


Abbildung 6.16: Ergebnisse der Planungsmethoden bei großem Abstand zwischen Überholer und Überholtem.

Abbildung 6.16 zeigt eine leicht veränderte Situation, in der sich das schwarze Fahrzeug bei gleicher Positionierung und Geschwindigkeit der anderen Fahrzeuge weiter vom weißen Fahrzeug entfernt befindet. Die Abbildungen 6.16a, 6.16c und 6.16e zeigen die Lösungsvorschläge der Planer.

Es fällt auf, dass auch in diesem Fall alle drei Planer mit dem Abbruch des Überholmanövers dieselbe Strategie berechnen. Die Methode der gerichteten Graphen (Abbildung 6.16a) berechnet einen Plan, in dem das schwarze Fahrzeug verglichen mit den anderen Plänen zuerst ein Fahrstreifenwechselmanöver durchführt. Die Methode des elastischen Bands hingegen sieht einen relativ späten Fahrstreifenwechsel vor (Abbildung 6.16c). Die kooperative Manöverplanung generiert einen Plan, der ein langgezogenes Fahrstreifenwechselmanöver des schwarzen Fahrzeugs beinhaltet (Abbildung 6.16e). Dadurch ergeben sich auch für denselben Moment der Plandurchführung andere Konstellationen der Fahrzeuge. Während das durch die Methode der gerichteten Graphen berechnete Fahrstreifenwechselmanöver bereits abgeschlossen ist, befindet sich das schwarze Fahrzeug im Plan des elastischen Bands kurz nach dem Gegenlenkmoment (vgl. Abbildung 6.16b und Abbildung 6.16d). Bei Planung mithilfe der kooperativen Manöverplanung befindet sich das schwarze Fahrzeug gegen Ende des langgezogenen Fahrstreifenwechsels (Abbildung 6.16f). Neben den Zeitpunkten und den Intensitäten des Fahrstreifenwechsels unterscheiden sich auch die Endpositionen der Fahrzeuge. Bei der kooperativen Manöverplanung wird die Mitte der Fahrstreifen, bei den anderen Methoden ein beliebiger Punkt auf dem Fahrstreifen angefahren.

Abbildung 6.17 zeigt eine hinsichtlich des Abstands noch kritischere Situation.

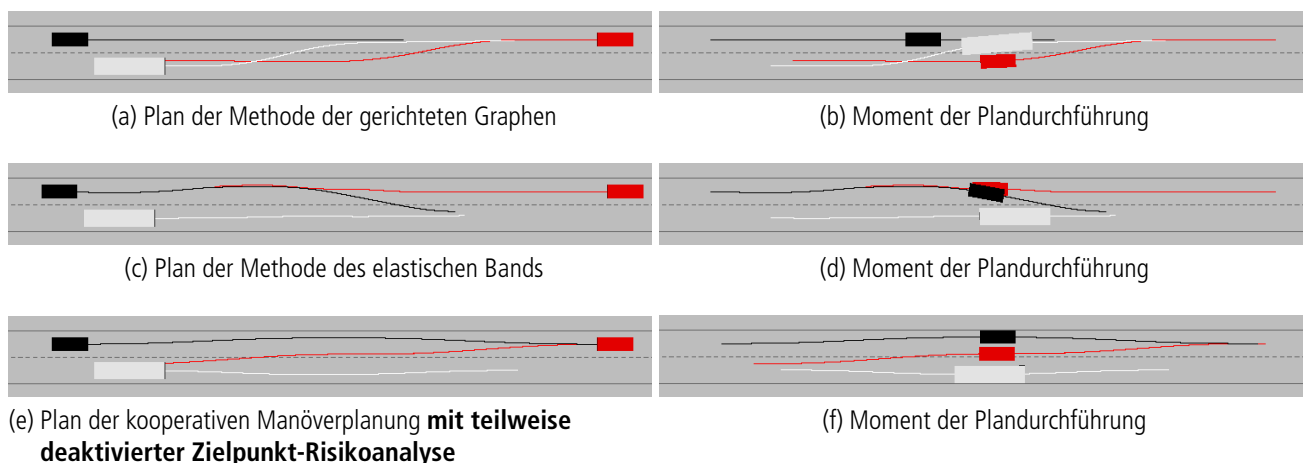


Abbildung 6.17: Ergebnisse der Planungsmethoden bei mittlerem Abstand zwischen Überholer und Überholtem ( $T = 2,6$  s).

Abbildung 6.17a zeigt den Plan, den die Methode der gerichteten Graphen berechnet. Er sieht vor, dass das schwarze Fahrzeug auf dem falschen Fahrstreifen verbleibt und die anderen beiden Fahrzeuge den Fahrstreifen wechseln, um so voreinander auszuweichen. Dieser Moment ist in Abbildung 6.17b illustriert. Der berechnete Plan verdeutlicht die nicht erfüllte Anforderung der Methode nach einem sicheren Endzustand. Eine solche Konfliktlösung ist zwar denkbar, erschwert jedoch die Fahrübernahme nach dem Manöver. Dazu ist nicht sichergestellt, dass die Situation, in der der Fahrer das Fahrzeug wieder übernehmen soll, sicher oder erneut eine kritische Situation ist. Die Methode des elastischen Bands ist nicht in der Lage, einen kollisionsfreien Plan zu berechnen. Wie in Abbildung 6.17c gezeigt, pendelt das schwarze Fahrzeug in seinem Fahrstreifen und befindet sich nach dem durchgeführten Plan an einem Ort mit dem weißen Fahrzeug. Abbildung 6.17d offenbart, dass der Plan zudem eine Frontalkollision zwischen dem schwarzen und dem roten Fahrzeug beinhaltet. Die kooperative Manöverplanung ist ebenfalls nicht in der Lage, einen kollisionsfreien und sicheren Plan zu bestimmen. Werden jedoch die Anforderungen an einen sicheren Endzustand aufgeweicht, so findet sie Lösungen. Der Plan aus Abbildung 6.17e sieht vor, dass das schwarze und weiße Fahrzeug jeweils an ihren rechten Fahrbahnrand fahren und das rote Fahrzeug durch die dann entstandene Lücke fährt. Der Moment der Vorbeifahrt ist in Abbildung 6.17f gezeigt. **Die Lösung kann mit der kooperativen Manöverplanung berechnet werden, wird im Normalbetrieb jedoch durch harte Randbedingungen ausgefiltert, da die eingenommenen Endzustände keine sicheren Endzustände sind.**

Bei Beibehaltung der Situation und einer Erhöhung der Manöverdauer ergibt sich das in Abbildung 6.18 gezeigte Resultat.

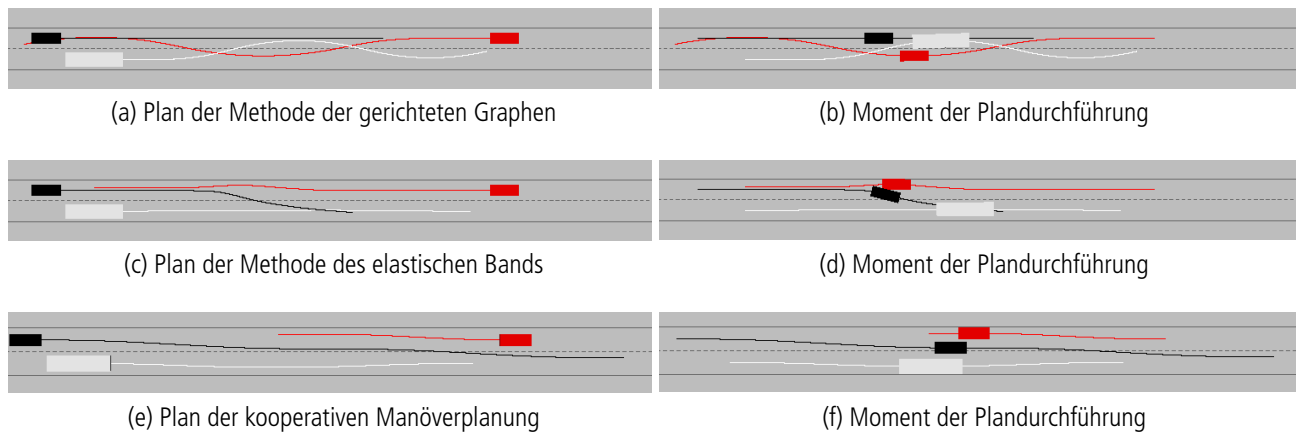


Abbildung 6.18: Ergebnisse der Planungsmethoden bei mittlerem Abstand zwischen Überholer und Überholtem ( $T = 3,2$  s).

Die Methode der gerichteten Graphen löst die Situation noch immer über einen Fahrstreifenwechsel der anderen Teilnehmer auf, die nun auf ihre eigenen Fahrstreifen zurückgelenkt werden (Abbildungen 6.18a und 6.18b). Dabei bleibt das schwarze Fahrzeug durchgängig auf dem Gegenfahrstreifen, wird also nicht auf seinen eigenen Fahrstreifen zurückgeführt. Es bleibt somit im Gegenverkehr und kann anschließend erneut in eine vergleichbar gefährliche Situation geführt werden. Diese Lösung ist denkbar, stellt aber keine favorisierte Auflösung des Konflikts dar. Die Methode des elastischen Bands erzeugt weiterhin einen Plan, dessen Durchführung kollisionsbehaftet ist (Abbildungen 6.18c und 6.18d). Auch diese Lösung ist bei vorhandener, kollisionsfreier Auflösung zu vermeiden. Anders sieht die Lösung der kooperativen Manöverplanung aus: Sie erzeugt nun Pläne, die den Konflikt auflösen und trotzdem die harten Randbedingungen der Risikoanalyse erfüllen, also sicher sind. Dazu wechselt das schwarze Fahrzeug in mehreren Teilmanövern vom linken in den rechten Fahrstreifen. Unterstützt wird es dabei durch die anderen beiden Fahrzeuge, die in Richtung ihres jeweiligen Fahrbahnrandes ausweichen und bremsen (Abbildungen 6.18e und 6.18f).

Der Vergleich der kooperativen Manöverplanung mit dem Stand der Wissenschaft und Technik zeigt, dass die

kooperative Manöverplanung in ausgewählten Situationen ähnliche Ergebnisse wie bekannte Methoden erzielt. Grundsätzlich sind alle drei gezeigten Methoden geeignet, kooperative Manöver mit mehreren Fahrzeugen zu planen. Die erzielten Ergebnisse der kooperativen Manöverplanung weisen eine größere Ähnlichkeit mit denen der Methode der gerichteten Graphen als mit denen der Methode des elastischen Bands auf. Es gibt Situationen, die die kooperative Manöverplanung auflösen kann, die von bekannten Methoden nicht kollisionsfrei geplant werden können. Dieses Ergebnis ist stark abhängig von der untersuchten Situation, der ausgewählten Parametrierung und der zur Verfügung stehenden Berechnungszeit. Ein konzeptioneller Unterschied der kooperativen Manöverplanung zum Stand der Wissenschaft und Technik besteht in der ausschließlichen Planung zu sicheren Endzuständen. Diese Eigenschaft ist ein Vorteil im Vergleich zu den Methoden des Stands der Wissenschaft und Technik.

Weitere Untersuchungen könnten eine Variation der Situationen und eine Variation der verwendeten Parametersätze umfassen. Bevor ein Vergleich mehrerer Planungsmethoden in großem Stile durchgeführt wird, muss die Frage nach der objektiven Bewertung geklärt werden. Ein mögliches Ergebnis könnte sein, vorausgesetzt diese Bewertung existiert, dass eine der Planungsmethoden besser als die anderen ist. Ein anderes Ergebnis könnte sein, dass jeder der drei Planer für bestimmte Situationen oder Konstellation besonders geeignet ist. Auch wenn gleich geeignete Planer verwendet werden und in einer Situation aufeinander treffen, muss eine Pattsituation vermieden werden. Diese kann durch feste Regeln oder durch einen definierten Prozess aufgelöst werden. Ein Prozess, der auch im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird, stellt die in Kapitel 4 vorgestellte kooperative Abstimmung dar. In jedem Fall sind weitere Untersuchungen hinsichtlich der Koexistenz von unterschiedlichen Planungsmethoden und deren Interaktionen notwendig.

#### 6.2.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die kooperative Manöverplanung ermöglicht die Konfliktlösung unterschiedlichster Situationen mit verschiedenen Arten und Anzahlen von Teilnehmern. So werden Szenarien in den drei Umgebungen mit Anwendung der Unfallvermeidung gelöst, welche die Erfüllung der Anforderungen an die Verwendung in allen Umgebungen und die Anwendung für Unfallvermeidung zeigen. Da jeweils zwei oder drei Fahrzeuge an diesen Situationen beteiligt sind, ist die Planung für mehrere Fahrzeuge und die Planung von Trajektorien für alle Teilnehmer ebenfalls nachgewiesen. Anwendungen für Komfort bzw. Effizienz weisen die Anwendbarkeit in allen drei Bereichen und für straßengebundene Fahrzeuge nach. Anhand der Situation des komfortablen Autobahnauffahrens wird die nicht entkoppelte Berechnung von Plänen und die Berücksichtigung von Fahrzeugeigenschaften und Fahrerpräferenzen gezeigt. Die nicht entkoppelte Berechnung führt zu einer Komplexität, dessen Ausmaß durch eine Parameterstudie aufgezeigt wird. Drei Parametersätze lösen die insgesamt 329.000 untersuchten konkreten Szenarien aus drei Bereichen unterschiedlich gut auf, lassen jedoch keinen Rückschluss auf einen besten Parametersatz zu. Erste Untersuchungen mit dem HiL-Verfahren stellen fest, dass sichere Endzustände und sichere Trajektorienkombinationen Grundlage der Planung sind, deren Einhaltung durch die Abweichungen bei der Planbefolgung trotzdem nicht sichergestellt werden kann. Die Methode kann auch mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern umgehen, wenn Prädiktionsmodelle eine Trajektorie für diesen Teilnehmer zur Verfügung stellen. Anhand von Ergebnissen zweier unterschiedlicher Prädiktionsmodelle hat sich gezeigt, dass die Güte der Prädiktion einen großen Einfluss auf den durch die kooperative Manöverplanung berechneten Plan besitzt. Der Vergleich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik verdeutlicht, dass sich die kooperative Manöverplanung auf dieselben Situationen anwenden lässt und ähnliche Ergebnisse erzeugt. Vorteile der kooperativen Manöverplanung bestehen darin, dass die Methode konzeptbedingt mit sicheren Endzuständen plant und Situationen aufzulösen vermag, die die untersuchten Methoden des Stands der Wissenschaft und Technik in vorliegender Parametrierung nicht lösen.

Neben dem aktuellen Stand der Methode zeigen die Simulationen auch Verbesserungspotenziale zur Untersuchung in weiterführenden Arbeiten auf. Die Methode kann prinzipbedingt in allen Umgebungen angewandt werden, zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind jedoch nur gerade Straßenabschnitte lösbar. Hinsichtlich der Ver-

wendung für Sicherheit, Komfort und Effizienz zeigt sich am Beispiel des Platooning-Fahrstreifenwechsels, dass das Platoon auseinandergezogen wird, da der Nutzen des Windschattenfahrens bisher durch keinen Kostenterm explizit berücksichtigt wird. Die Umsetzung weiterer Anwendungen ist über das Hinzufügen von Kostentermen möglich. Weiterhin ist zu untersuchen, wie sich die nicht vorhandene Entkopplung auf eine höhere Anzahl von Fahrzeugen auswirkt. Ist die Methode in der Lage, mehr als drei Fahrzeuge zu planen? Was passiert, wenn die Fahrzeugfähigkeiten eines der Fahrzeuge oder die Fahrerpräferenzen nicht bekannt sind? Werden dann Standardwerte für die Berechnung bzw. Bewertung der Handlungsoptionen verwendet? Wie gezeigt, können bestimmte Fahrerpräferenzen auch dazu führen, dass das Ziel der Kooperation nicht erreicht wird. Ist die Überführung in einen sicheren Zustand für alle erstrebenswert, auch wenn das Ziel der Kooperation nicht erreicht wird? Oder muss die Zielerreichung durch weitere Kostenterme oder harte Randbedingungen sichergestellt werden? Auch die finale Parametrierung der Methode ist bisher ungeklärt. Dazu zählt die Wahl der Manöverdauer, die in dieser Ausprägung iterativ von einem unteren Schwellwert ausgehend angehoben wird, bis eine Lösung berechnet werden kann. Ziel muss es sein, möglichst viele *physikalisch lösbar*e Situationen zu bewältigen, ohne dabei weiche Echtzeitfähigkeit zu verlieren. Eine Möglichkeit besteht in einer intelligenten Algorithmik, die die Parameter adaptiv einstellt und somit für bestmögliche Ergebnisse sorgt. Hinsichtlich der Sicherheit der Planung sind weitere Untersuchungen mit dem HiL-Verfahren notwendig. Außerdem müssen Maßnahmen untersucht werden, die die Umsetzung der Planungsmethode trotz einer nicht optimalen Planbefolgung im Realfahrzeug ermöglichen. Eine Maßnahme ist die Verwendung eines anderen Fahrzeugmodells, welches Unsicherheiten bei der Planbefolgung bereits berücksichtigt. Zudem muss mit einem Überwachungsmodul ein kontinuierlicher Prozess geschaffen werden, der Abweichungen detektiert und deren Einfluss abschätzt. Nachdem gezeigt wurde, dass die Prädiktion einen großen Einfluss auf die erzeugten Pläne hat, bleibt offen, welches Prädiktionsmodell sich am besten für den Einsatz in der kooperativen Manöverplanung eignet. Der Vergleich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik sollte in weiteren Situationen vorgenommen werden. Es zeigt sich, dass die Strategie der untersuchten Planer identisch war. Gibt es Fälle, in denen die Strategien voneinander abweichen? Welche Strategie ist dann besser? Wie kann ein *besser* ohne vorhandene Referenz bewertet werden? Ist eine Planungsmethode *besser* als die anderen oder hängt dies auch von der Situation ab?

## 6.3 Kooperative Abstimmung

Dieser Abschnitt zeigt Ergebnisse zur kooperativen Abstimmung. In Abschnitt 6.3.1 werden die an sie gestellten Anforderungen in direkte und indirekte unterteilt, wobei das Vorgehen für den Test der direkten Anforderungen beschrieben wird. Die Ergebnisse dieser Tests werden in Abschnitt 6.3.2 vorgestellt und diskutiert. Dabei werden einerseits die Potenziale der kooperativen Abstimmung beschrieben und andererseits noch offene Fragestellungen diskutiert. Der Ergebnisteil der kooperativen Abstimmung schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Abschnitt 6.3.3.

### 6.3.1 Testbeschreibung

In diesem Abschnitt werden die Tests zum Nachweis der Erfüllung der Anforderungen der kooperativen Abstimmung, die in Abbildung 6.19 gezeigt ist, definiert. Anhand von Derivaten dieses Prozessschaubildes und zugehöriger Szenarien wird die Erfüllung der Anforderungen gezeigt. Die Anforderungen lassen sich in indirekte und direkte Anforderungen einteilen. Indirekte Anforderungen betreffen Punkte, die nur mittelbar durch die Methode der kooperativen Abstimmung erfüllbar sind. So ist der Einsatz von Kommunikation vorgesehen, sie muss jedoch von den Fahrzeugen auch mittels eines funkbasierten Nachrichtenaustausches durchgeführt werden. Neben Fahrzeugen ist auch die Einbindung von Infrastruktur als Kommunikationspartner möglich. Die kooperative Abstimmung ist eine Technologie, deren Verwendung in allen Umgebungen bei einer Anwendbarkeit für Sicherheit, Komfort und Effizienz konzeptionell vorgesehen ist. Die Erfüllung dieser Anforderung hängt jedoch, ebenso wie bei der Planung von Trajektorien aller Teilnehmer, von den Eigenschaften der Planungsmethode ab. Diese Anforderungen können deshalb als Randbedingungen zur Entfaltung des vollen Potenzials der kooperativen

Abstimmung angesehen werden. Gleichmaßen verhält es sich mit dem Aufbau eines gemeinsamen Umfeldmodells: Ein lokales Umfeldmodell wird um gemeinschaftliche Sensorobjekte erweitert, sofern die betreffenden Fahrzeuge über die Module der kollektiven Perzeption verfügen, deren Nutzen beispielsweise von Günther et al. [104] untersucht wird.

Die Erfüllung der direkten Anforderungen wird anhand von Schaubildern simuliert und illustriert, die aus Abbildung 6.19 abgeleitet sind. Dabei wird erläutert, welche Module und Nachrichten notwendig sind, um die untersuchte Anforderung zu erfüllen. Die Alleingestaltung der Lösung erfordert als zentrale Planungseinheit deutlich weniger Austausch zwischen den Teilnehmern, kann jedoch auf die verbindliche Zusage nicht verzichten, welche die Wahrung der Autonomie sicherstellt. Die Mitgestaltung der Lösung nutzt die volle Bandbreite an Austauschmöglichkeiten und somit das volle Potenzial der kooperativen Abstimmung aus.

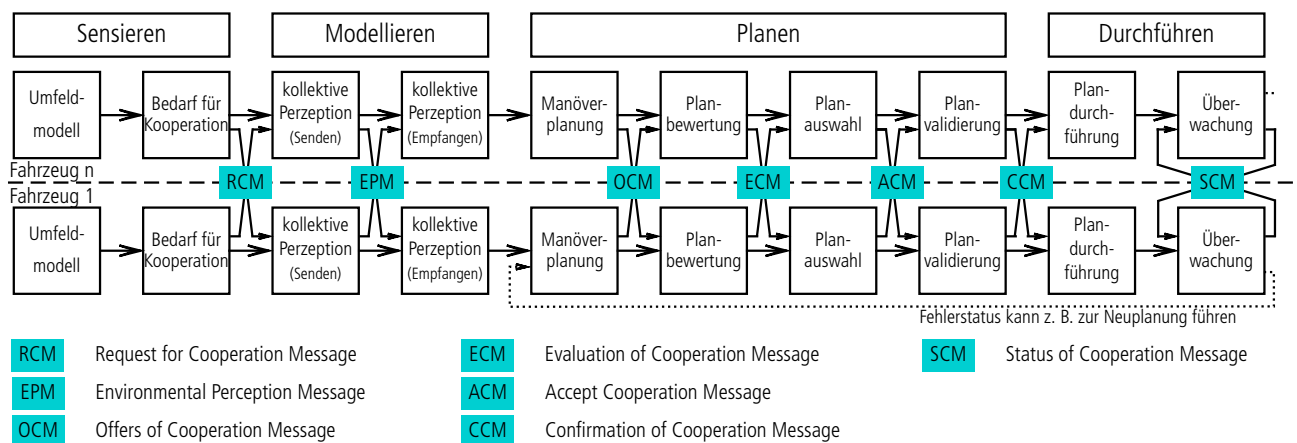


Abbildung 6.19: Die Architektur der kooperativen Abstimmung in Anlehnung an [80].

### 6.3.2 Anforderungsabgleich

Es besteht die Anforderung der Möglichkeit der Alleingestaltung der Lösung, also die Lösungsfindung durch nur einen Teilnehmer als zentrale Planungseinheit. In diesem Fall entfallen alle modellierenden und planenden Module der anderen Fahrzeuge, da Fahrzeug 1 (oder Infrastruktur 1) die Planung übernimmt. Das Prozessschaubild ist in Abbildung 6.20 gezeigt. Eines der anderen Fahrzeuge löst eine RCM aus und startet somit den Modellierungsprozess in der zentralen Variante. Da keine EPM eingegangen sind, entspricht das kollektive Umfeldmodell dem lokalen. Die Manöverplanung berechnet auf Basis dieses lokalen Umfeldmodells Pläne und verteilt die Plä-

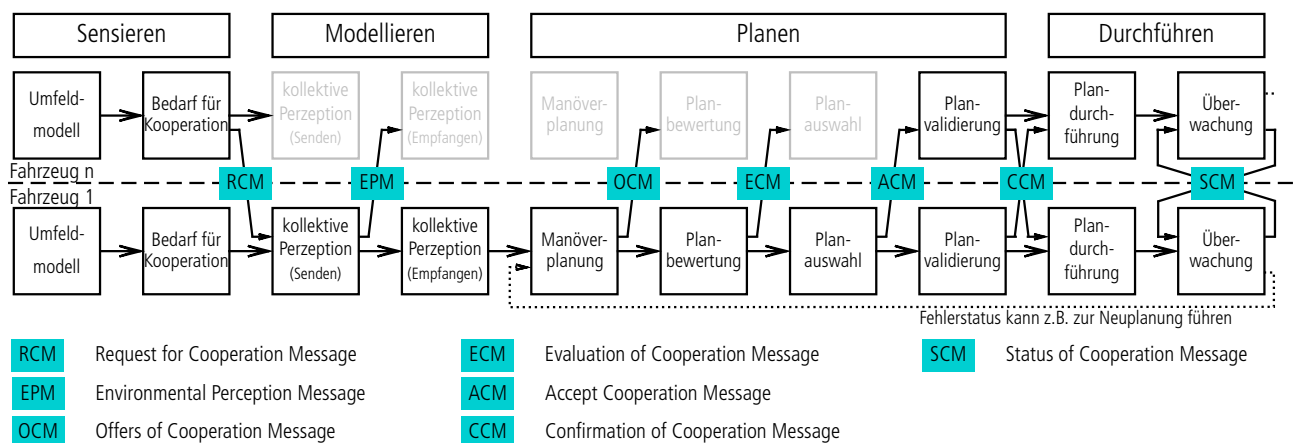


Abbildung 6.20: Zentrale Variante der kooperativen Abstimmung.

ne als OCM an die betroffenen Fahrzeuge. Anschließend wird eine Bewertung dieser Pläne durchgeführt, die mithilfe der ECM ebenfalls verteilt wird. Die Bewertung der Pläne erfolgt in diesem Fall nicht aus einer rein individuellen Perspektive, sondern berücksichtigt bekannte oder angenommene Präferenzen der anderen Fahrzeuge. So wird beispielsweise bei der Beteiligung von LKW von anderen Kostenfaktoren für Brems- oder Lenkmanöver als bei einem Sportwagen ausgegangen. In der zentralen Variante wird der beste Plan ausgewählt und mithilfe der ACM versandt. Jedes Fahrzeug validiert diesen Plan und sendet seinerseits eine CCM, die dem Planer und allen anderen mitteilt, dass der berechnete Plan akzeptiert wurde. An dieser Stelle könnten beispielsweise Kollisionen detektiert werden, die der zentrale Planer aus seinem lokalen Umfeldmodell nicht erkennen konnte, da die betreffenden Hindernisse verdeckt waren. Bei erfolgreicher Validierung der Pläne durch alle Beteiligten wird der Plan durchgeführt. Die korrekte Planbefolgung kann mittels der von allen ausgesandten SCM verfolgt werden.

Neben der Alleingestaltung der Lösung wird gleichzeitig die Wahrung der Autonomie in der kooperativen Fahrfunktion gezeigt: Durch die Validierung (CCM) und die Übermittlung des Status (SCM) ist die Teilnahme über den gesamten Prozess freiwillig. Gerade für den Fall einer zentralen Planung ist ein Abbruchkriterium zur Wahrung der Autonomie zwingend notwendig, um unbekannte oder unvorhergesehene Ereignisse in der Plandurchführung berücksichtigen zu können.

Die **Erfüllung der Anforderungen der Alleingestaltung der Lösung** und der **Wahrung der Autonomie in der kooperativen Fahrfunktion lassen sich anhand des Beispiels zeigen**. Es ist möglich, dass ein Teilnehmer oder straßenseitige Infrastruktur Pläne erzeugt und diese den anderen Teilnehmern zur Durchführung zur Verfügung stellt. Dabei ist der Aspekt der Autonomiewahrung gewährleistet, da eine verbindliche Zusage in Form einer CCM erfolgen muss, um das kooperative Fahrmanöver zu starten. Was passiert, wenn diese Zusage nicht rechtzeitig von allen Teilnehmern vorliegt und der Konflikt somit nicht auflösbar ist, sollte Untersuchungsgegenstand in weiterführenden Arbeiten sein.

Die Alleingestaltung schafft ein Maximum an Gestaltungsspielraum für die zentrale Planung eines Einzelnen mit notwendiger Zustimmung der Anderen. Es besteht auch die Möglichkeit der Mitgestaltung bei der Lösung, was im Folgenden als Peer-Variante bezeichnet wird. Dabei können einzelne Module erhalten bleiben, ohne dass die komplette Kette in einem Fahrzeug durchlaufen werden muss. Abbildung 6.21 zeigt das zugehörige Derivat der kooperativen Abstimmung. In diesem Beispiel löst Fahrzeug 1 den Bedarf für Kooperation mithilfe der RCM aus. Die anderen Fahrzeuge beteiligten sich am Aufbau eines gemeinsamen, kollektiven Umfeldmodells durch die Versendung von Umfeldnachrichten (EPM). Genau wie Fahrzeug 1 integrieren die anderen Fahrzeuge die nicht von ihnen versandten EPM in ihr Umfeldmodell. Nur Fahrzeug 1 führt eine Manöverplanung aus, dessen Ergebnisse mehrere, mittels OCM verteilte Pläne sind. Alle Fahrzeuge nehmen nun an der Planbewertung teil und verteilen ihre Ergebnisse mittels ECM. Die Planauswahl geschieht wieder ausschließlich in Fahrzeug 1, welches den favorisierten Plan als ACM versendet. Alle Fahrzeuge validieren den Plan und nehmen an der Durchführungsphase teil, sofern keine Vetos versandt werden. Neben der Mitgestaltung wird somit auch der Punkt der *Vernetzung heterogener Fahrzeuggruppen* thematisiert. Solange die Fahrzeuge die geforderten Schnittstellen bedienen, ist der Grund der Enthaltung der Mitgestaltung in einzelnen Modulen unerheblich. Heterogene Fahrzeuggruppen können mithilfe der kooperativen Abstimmung Konflikte auflösen, sofern sie sich an die Schnittstellen halten und jedes geforderte Modul einmalig in der Gruppe bedient wird. Damit der Prozess der kooperativen Abstimmung, ob in heterogenen oder homogenen Fahrzeuggruppen, zeitlich nicht ins Stocken gerät, werden Zeitintervalle für die Gültigkeit von Nachrichten definiert. So ist es nicht mehr möglich, Pläne vorzuschlagen, wenn die Fahrzeuge schon bei der Planauswahl sind. Diese Zeitintervalle verhindern, dass Schleifen auftreten, die den Prozess im Extremfall unendlich lange ohne Ergebnis aufhalten könnten.

Das Derivat aus Abbildung 6.21 zeigt, dass die **Anforderungen der Mitgestaltung der Lösung**, die **Vernetzung heterogener Fahrzeuggruppen** und die **Verhinderung von Schleifen erfüllt sind**. Da die Nachrichten eine endliche Gültigkeit besitzen, ist es nicht möglich, den Prozess in einem der Schritte zu blo-

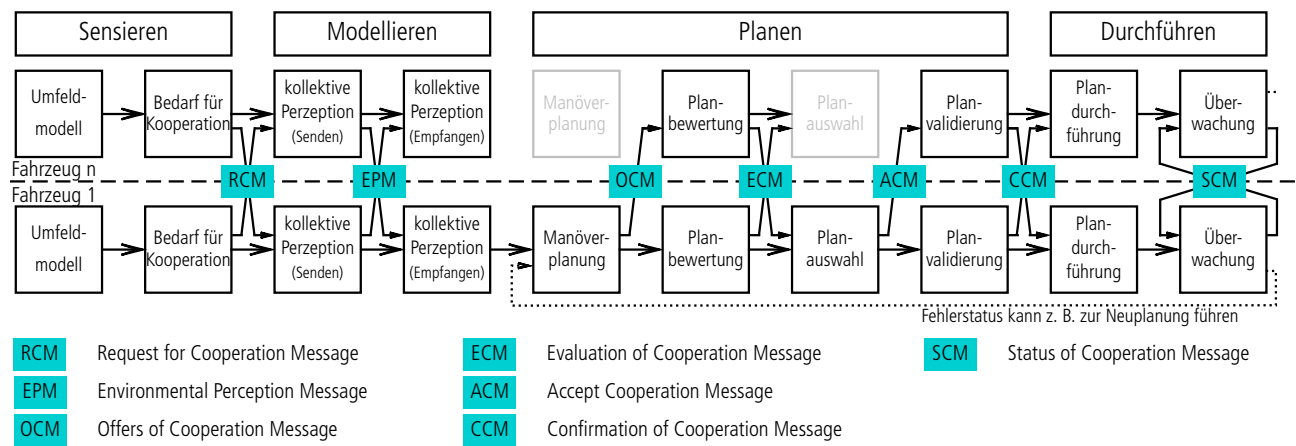


Abbildung 6.21: Peer-Variante der kooperativen Abstimmung.

kieren. Es bleibt zu prüfen, wie eine Manöverplanung hinreichend unterschiedliche Pläne erzeugen kann, damit eine unvorbelastete Menge an Plänen zur Verfügung steht. Werden beispielsweise 100 unterschiedliche Pläne vorgeschlagen, die sich jedoch nur in Detailwerten unterscheiden, so kann sich der Planberechner einen unrechtmäßigen Vorteil verschaffen. Außerdem bleibt offen, wie groß die Zeitintervalle sein müssen und dürfen, damit sie einerseits zur Dauer der Berechnungsschritte passen und andererseits nicht zu lang für die Anwendung in einer realen Konfliktsituation sind.

Neben der zentralen und der Peer-Variante gibt es auch eine Ausführung für eine dezentrale Planung. Die dezentrale Planung erlaubt das Vorhandensein unterschiedlicher Methoden zum Planen kooperativer Manöver. Abbildung 6.22 zeigt die kooperative Abstimmung mit zwei unterschiedlichen Planern. In diesem Fall läuft die kooperative Abstimmung identisch zum Prozess in Abbildung 6.19, mit dem Unterschied, dass zwei unterschiedliche Manöverplaner zum Einsatz kommen. Diese müssen ein einheitliches oder zumindest bekanntes Format für die Repräsentation der Pläne besitzen, damit diese anschließend von allen Teilnehmern bewertet werden können. Am Ende wird der Plan ausgewählt, der die beste Bewertung bekommen hat, also das Manöver beinhaltet, welches für diese Situation die Gesamtkosten minimiert.

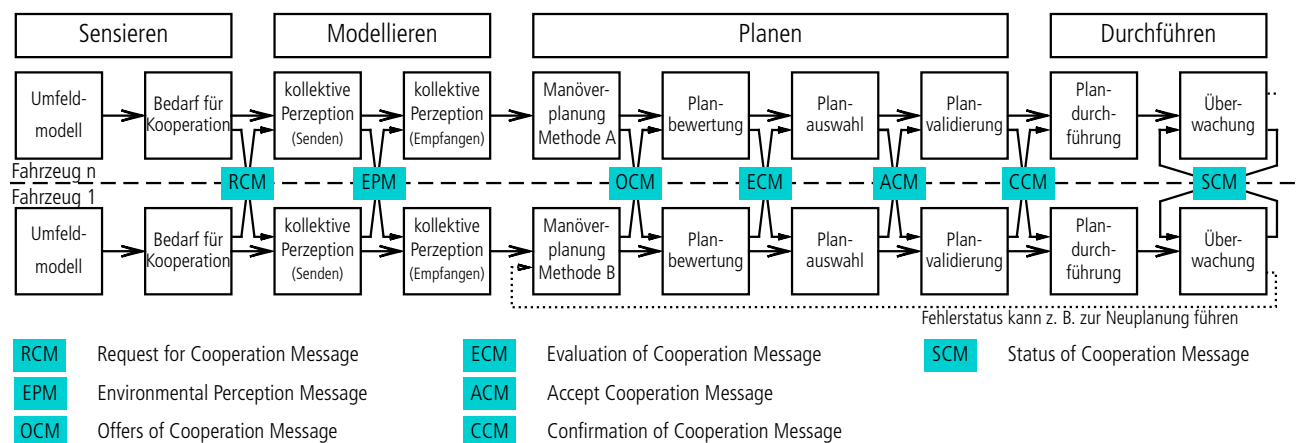


Abbildung 6.22: Dezentrale Variante der kooperativen Abstimmung.

Dieses Beispiel zeigt, dass die kooperative Abstimmung die **Anforderung** einer **dezentralen Planung mit unterschiedlichen Planungsmethoden erfüllt**. Die Planer müssen die Schnittstellen bedienen, damit die Fahrzeuge die erzeugten Pläne interpretieren können. Dieses Format bleibt zu definieren, damit die kooperative Abstimmung auch mit unterschiedlichen Fahrzeugherstellern funktioniert.

### 6.3.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die kooperative Abstimmung ermöglicht die Aufgabenkoordination eines fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems, da es alle an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Eine Einteilung der Anforderungen in indirekte und direkte Anforderungen teilt die Anforderungen in Randbedingungen für verwendete Planer zur vollen Entfaltung des Potenzials der kooperativen Abstimmung (indirekte Anforderungen) und durch die kooperative Abstimmung zu realisierende Anforderungen (direkte Anforderungen). Die Erfüllung der direkten Anforderungen wurde mithilfe von Derivaten der kooperativen Abstimmung gezeigt. Die zentrale Variante der kooperativen Abstimmung erlaubt die Alleingestaltung der Lösung bei gleichzeitiger Wahrung der Autonomie aller Beteiligten während der kooperativen Fahrfunktion. Die Peer-Variante der kooperativen Abstimmung illustriert die Erfüllung der Anforderungen der Mitgestaltung, die Vernetzung heterogener Fahrzeuggruppen und die Verhinderung von Schleifen. Die dezentrale Variante der kooperativen Abstimmung zeigt, dass unterschiedliche Planungsmethoden Pläne für eine Konfliktsituation erstellen können, sofern sie sich an die Schnittstellen halten.

Neben den bereits aufgestellten und erfüllten Anforderungen bleiben einige Punkte der kooperativen Abstimmung in dieser Arbeit unbeantwortet, die in weiterführenden Arbeiten untersucht werden sollten. So ist nicht geklärt, was in der zentralen Variante der kooperativen Abstimmung geschehen soll, wenn die Zusage in Form der CCM nicht rechtzeitig von allen Teilnehmern vorliegt. Ist die CCM in der späteren Anwendung notwendig oder kann diese durch die ACM ersetzt werden? Kann es dazu kommen, dass ein einzelner Teilnehmer den Konflikt eines anderen nicht wahrnimmt und die RCM verwirft? Was geschieht, wenn ein Fahrzeug in zwei Konfliktsituationen gleichzeitig involviert ist? Ist die Priorisierung von RCM, die zu unterschiedlichen Konflikten gehören, sinnvoll? Wie kann in einer Peer-Variante der kooperativen Abstimmung sichergestellt werden, dass die Fahrzeuge nicht nur Pläne zur Bewertung stellen, die sie bevorteilen? Zur Verhinderung der Schleifen ist außerdem ein geeignetes Zeitintervall zu definieren, dessen Länge für die Phasen der Abstimmung unterschiedlich ausfallen kann. Auch bleiben Fragen der dezentralen Variante der kooperativen Abstimmung offen, die das Format der Pläne, die Bewertungsskala und die Kanallast unterschiedlicher Derivate betreffen. Findet die Generierung der RCM auf Basis des lokalen oder des kollektiven Umfeldmodells statt?

## 6.4 Kooperatives Verhalten

Dieser Abschnitt beschreibt die Ergebniserzeugung bezüglich der Definition von kooperativem Verhalten. In Abschnitt 6.4.1 werden die Anforderungen aufgezählt und die zur Darstellung verwendeten Tests und Szenarien beschrieben. Diese Anforderungen werden in Abschnitt 6.4.2 mit den aufgezeigten Tests untersucht. Zudem werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Abschnitt 6.4.3 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt neben einer Zusammenfassung über die Ergebnisse auch einen Ausblick auf offene Fragestellungen, die in weiterführenden Arbeiten beleuchtet werden sollten.

### 6.4.1 Test- und Szenarienbeschreibung

Die Tests, die zum Anforderungsabgleich der Definition kooperativen Verhaltens durchgeführt werden, sind im Folgenden einzeln beschrieben. Die ersten drei Anforderungen, die die *notwendige Situation*, die *Nennung der Beteiligten und deren Interaktionen* und das *gezielte Verhalten* betreffen, werden als Randbedingung der Definition nicht durch einen speziellen Test beschrieben. Werden diese drei Anforderungen nicht erfüllt, so lässt sich die neu entwickelte Definition kooperativen Verhaltens nicht anwenden. Die Erfüllung der Anforderung der *Steigerung des Gesamtnutzens bzw. Verringerung der Gesamtkosten* wird an einer Komfortsituation des Autobahnauffahrens gezeigt. Hierbei sind die Spielräume am größten, welche unterschiedliche Pläne erlauben und somit die Anforderung deutlich aufzeigen. Eine vergleichbare Untersuchung wurde ebenfalls auf einer Autobahnauffahrt mit einem anderen Planungsverfahren und einer anderen Kostenfunktion durchgeführt [59]. Für



die Darstellung der *Reziprozität* wird eine Situation ausgewählt, in der ein Verkehrsteilnehmer ohne dessen Berücksichtigung ausschließlich die Nachteile des kooperativen Verhaltens erfahren würde. Die Untersuchung dazu wurde an drei aufeinanderfolgenden Autobahnauffahrten durchgeführt [230]. Dabei verbleibt ein Fahrzeug auf der Autobahn und passiert drei Autobahnauffahrten, an denen es mit Fahrzeugen, die auf die Autobahn auffahren möchten, in Konflikt gerät (A2K).

## 6.4.2 Anforderungsabgleich

Die Untersuchungen zu den zwei verbleibenden Anforderungen werden nachstehend einzeln beschrieben und ausgewertet.

Die Erfüllung der Anforderung der *Steigerung des Gesamtnutzens/Verringerung der Gesamtkosten* wird in einem Autobahnauffahrtsszenario gezeigt. Dazu werden unterschiedliche Pläne berechnet, die nach einer Kostenbetrachtung in eine Liste übertragen werden. Der beste Plan, also der Plan, der die Definition des kooperativen Verhaltens am besten erfüllt, wird entsprechend ausgewählt. Abbildung 6.23 zeigt die Situation mit unterschiedlichsten Möglichkeiten, diese aufzulösen. In Abbildung 6.23a ist die Ausgangssituation gezeigt, in der zwei Fahrzeuge (PKW) gleichschnell nebeneinander fahren und das schwarze Fahrzeug auf die Autobahn aufzufahren versucht. Abbildung 6.23b stellt alle Möglichkeiten der Interaktion der Fahrzeuge dar. Die Auswahl der Interaktion, die das kooperative Manöver darstellt, ist nun Ziel der Anwendung der Definition kooperativen Verhaltens. Dazu sind in den Abbildungen 6.23c bis 6.23h ausgewählte Pläne und ihre Kosten dargestellt. Nach dem im Anhang definierten Kostenfunktional ist das kooperative Manöver ein Fahrstreifenwechsel des weißen Fahrzeugs zur Ermöglichung des Auffahrens des schwarzen Fahrzeugs (Abbildung 6.23c). Abbildung 6.23d zeigt einen Plan mit höheren Kosten, in dem das weiße Fahrzeug auf seinem Fahrstreifen verbleibt und das schwarze Fahrzeug nicht auf die Autobahn auffahren kann. Wenn das weiße Fahrzeug seinen Fahrstreifen wechselt, obwohl das schwarze Fahrzeug nicht auf die Autobahn auffährt, dann erzeugt dies wiederum höhere Kosten (Abbildung 6.23e). Der in Abbildung 6.23f gezeigte Plan wird noch schlechter bewertet, da das weiße Fahrzeug bremst, um dem schwarzen Fahrzeug die Auffahrt zu ermöglichen. Die Pläne aus den Abbildungen 6.23g und 6.23h zeigen, dass das weiße Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel oder ein Bremsmanöver durchführt, obwohl das schwarze Fahrzeug ebenfalls stark bremst und zusätzliche Kosten durch das Annähern an seinen rechten

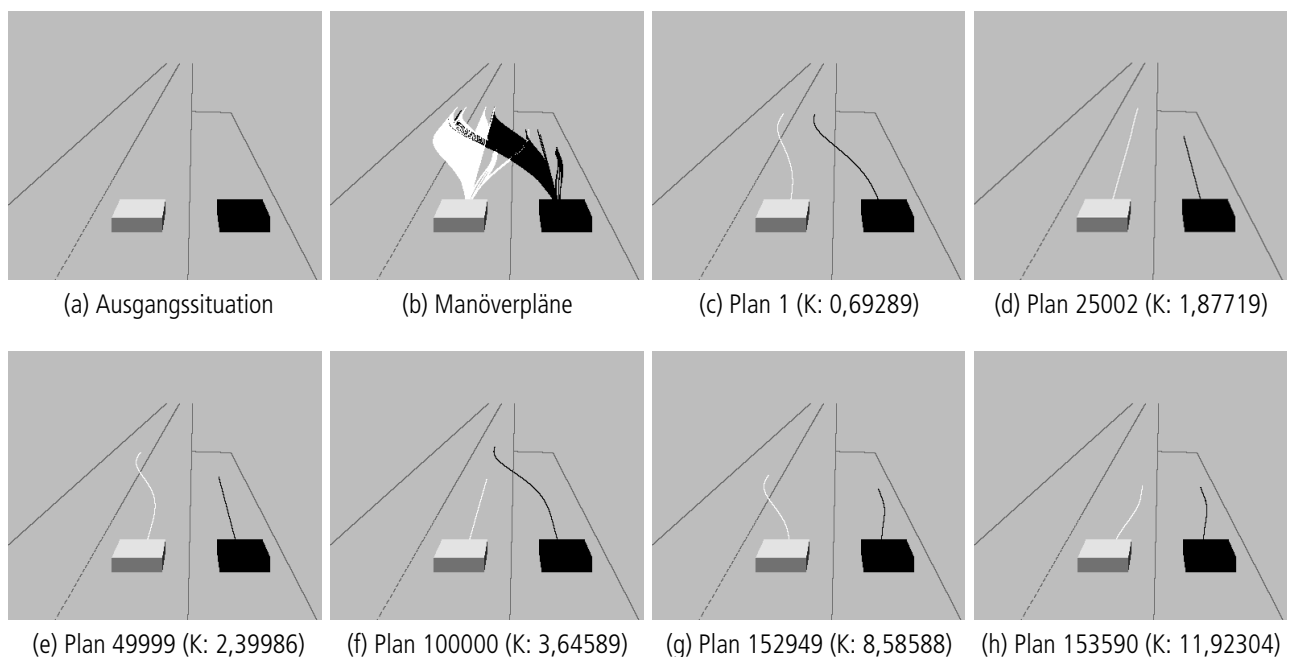


Abbildung 6.23: Minimierung der Gesamtkosten als Teil der Definition kooperativen Verhaltens (A2K).

Fahrbahnrand auf sich nimmt. Bei der Einordnung der Plausibilität der Pläne fällt auf, dass sich die Pläne mit niedrigen Kosten eher mit Alltagserfahrungen decken. Gerade der erste Plan beinhaltet häufig zu beobachtende Manöver. Auch eine Vorbeifahrt der Fahrzeuge, wie im zweiten dargestellten Plan, ist häufiger zu beobachten. Der kostenintensivste Plan, in dem beide Fahrzeuge sehr stark verzögern und an den Straßenrand fahren, scheint hingegen eher zweifelhaft.

Die Ergebnisse decken sich mit denen einer anderen Untersuchung mit einem anderen Kostenfunktional und einer anderen Planungsmethode. Dort wurde gezeigt, dass einige Verhaltensweisen als kooperativ bezeichnet werden können, während andere nicht kooperativ sind [59]. Entscheidend für die Einteilung ist lediglich der Nutzen für die Beteiligten: Ist der Gesamtnutzen gestiegen, so handelt es sich um ein kooperatives Manöver.

Mit einer Bewertung durch eine definierte Kostenfunktion ist es möglich, mithilfe des Gesamtnutzens sinnvolle Lösungen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Lösungen zu extrahieren. Je nach Kostenfunktion variiert die Auswahl des besten Plans, da andere Faktoren zur Berechnung der Kosten herangezogen werden. Durch die Anforderung der Gesamtkostenminimierung bzw. Gesamtnutzenmaximierung ist ein geeignetes Maß für kooperatives Verhalten geschaffen. Dieses Maß wird in der kooperativen Manöverplanung verwendet und erzeugt Ergebnisse, die einen Kompromiss zwischen den Kostenfunktionen aller Beteiligten darstellen. **Die Anforderung der Berücksichtigung der Steigerung des Gesamtnutzens/Verringerung der Gesamtkosten ist somit erfüllt.** Offen bleibt die Frage, ob sich die für den Fahrer wichtigen Punkte durch Kostenfunktionen in jeder Situation abbilden lassen. So könnte es sein, dass der Fahrer Faktoren situativ anpasst oder seine Wünsche nicht explizit benannt werden können. Ein gutes Gefühl, welches durch das Helfen entsteht, lässt sich zwar in Kostenfunktionen abbilden, ist jedoch zum Beispiel in Abhängigkeit der Tagesform oder in Zeitnot adaptiv zu parametrieren.

Die Definition von kooperativem Verhalten soll Reziprozität berücksichtigen. Eine Voruntersuchung hat gezeigt, dass Verkehrsteilnehmer nicht ausschließlich von kooperativem Verhalten profitieren [304]. Daher ist die Berücksichtigung von Reziprozität ein wichtiger Teil, der in einem Autobahnszenario gezeigt wird, bei dem ein Verkehrsteilnehmer drei Autobahnauffahrten passiert und jedes Mal in eine gekoppelte Situation gerät.

Abbildung 6.24 zeigt dieselbe Situation wie Abbildung 6.25, mit dem Unterschied, dass in der erstgenannten Situation keine Reziprozität berücksichtigt wird. In beiden Abbildungen (Abbildung 6.24a und 6.25a) wird in der ersten gekoppelten Situation ein kooperativer Plan errechnet, der das rote Fahrzeug (Fahrzeug auf der Autobahn) zum einem Bremsmanöver zwingt, während das andere Fahrzeug auf die Autobahn auffährt. Das gleiche Bild ergibt sich an der nächsten Auffahrt, an der ein anderes Fahrzeug auf die Autobahn fahren möchte. Auch hier wird das rote Fahrzeug in den Abbildung 6.24b und 6.25b ausgebremst, um dem anderen Fahrzeug das Auffahren zu ermöglichen. Die Berücksichtigung der Reziprozität zeigt sich nun in den Abbildungen 6.24c bzw.

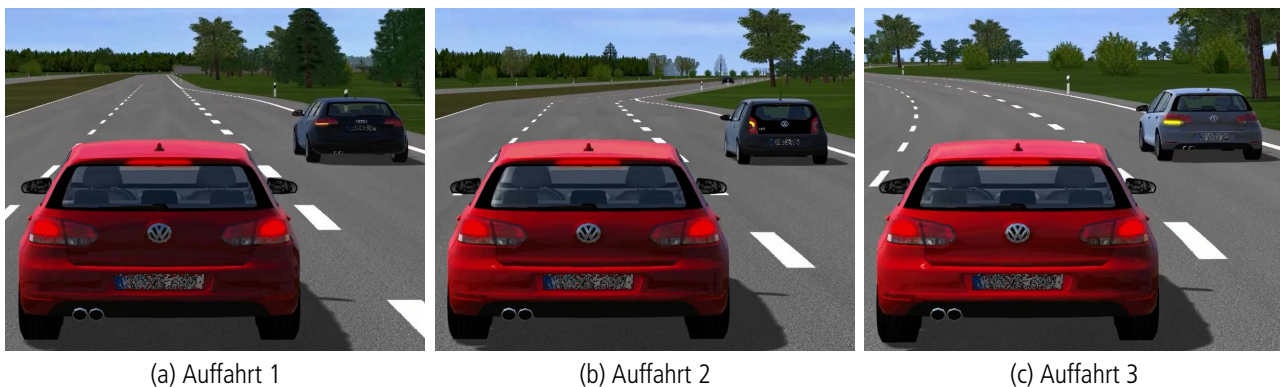


Abbildung 6.24: Konsekutive Lösung von Konfliktsituationen ohne Reziprozität (3x A2K).

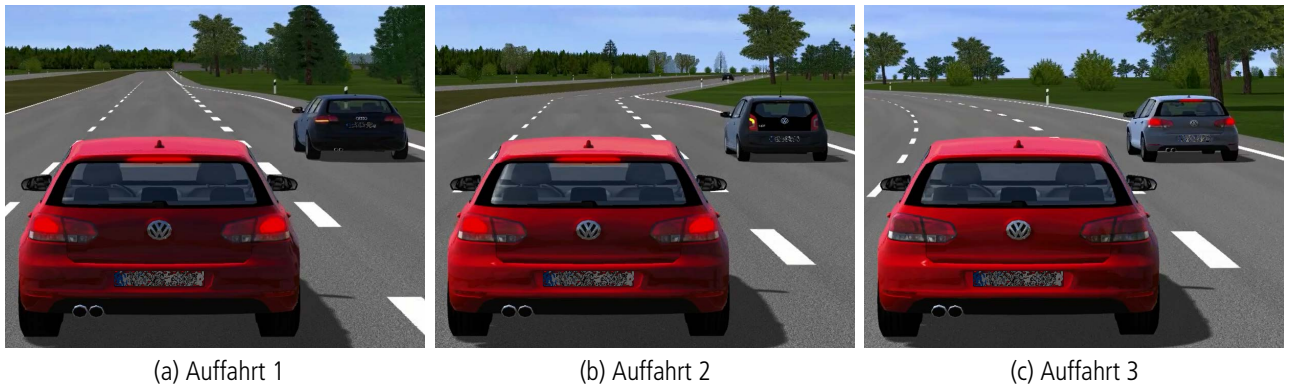


Abbildung 6.25: Berücksichtigung vorheriger kooperativer Handlungen (3x A2K).

6.25c: Während das Fahrzeug in Abbildung 6.24c erneut bremst, wird es in Abbildung 6.25c nicht ausgebremst und kann weiterfahren. Das Fahrzeug, welches den Auffahrwunsch hatte, muss dementsprechend verzögern und hinter dem roten Fahrzeug einfädeln. Dieses Verhalten wurde als kooperatives Verhalten bestimmt, da die kooperativen Verhaltensweisen aus der Vergangenheit einen Einfluss auf die zukünftigen Kosten haben.

Es zeigt sich, dass vergangene Handlungen durch Anwendung der Reziprozität einen Einfluss auf zukünftige Entscheidungen haben. **Die Anforderung der Berücksichtigung von Reziprozität wird demnach erfüllt.** Reziprozität spielt bei der wiederholten Auflösung von Situationen eine wichtige Rolle, damit das kooperative Verhalten nicht zu Lasten einzelner Teilnehmer geht. Denkbar ist, dass bestimmte Verkehrsteilnehmer aufgrund äußerer Umstände somit häufiger von kooperativem Verhalten profitieren oder benachteiligt werden als andere. Dies ist durch eine Art kooperative Währung auszuschließen, dessen Kontostand nutzerspezifisch beispielsweise durch altruistisch-kooperatives Verhalten aufgefüllt werden kann. Wie lange kooperativ aufgelöste Situationen zurückliegen sollten, ist bisher noch nicht geklärt. Auch die Höhe der Vergütung für bestimmte kooperative Manöver ist noch zu eruieren. Diese und weitere Fragestellungen könnten in Zukunft mit einer Probandenstudie adressiert und quantifiziert werden.

### 6.4.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Definition kooperativen Verhaltens ermöglicht die Unterscheidung von kooperativem und nicht kooperativem Verhalten. Die Erfüllung von fünf an sie gestellte Anforderungen beschreibt den Kerngedanken der Definition. Die ersten drei Anforderungen (*die notwendige Situation*, *die Nennung der Beteiligten und deren Interaktionen* sowie das *gezielte Verhalten*) sind als Rahmenbedingungen aufzufassen, die erfüllt sein müssen, damit die Definition gilt. Die Untersuchung der anderen zwei Anforderungen in Beispielsituationen zeigt, dass diese erfüllt werden. So ist die *Steigerung des Gesamtnutzens bzw. die Verringerung der Gesamtkosten* ein Aspekt, der aus einer Vielzahl von Handlungsmöglichkeiten diejenigen auswählt, die als kooperativ bezeichnet werden können. Damit hängt die Einteilung kooperativer bzw. nicht kooperativer Verhalten von den Einzelkostenfunktionen der Teilnehmer ab. Die Erfüllung der Anforderung der Reziprozität zeigt sich in einer wiederholten gekoppelten Situation, in der ein Fahrzeug ohne dessen Berücksichtigung wiederholt zurücksteckt. Durch die Berücksichtigung zurückliegender, kooperativer Verhaltensweisen wird es möglich, diese wiederholte Aufnahme von Kosten zu reduzieren. Dies kann durch eine kooperative Währung realisiert werden, die Kosten durch das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem fair unter den Nutzern verteilt.

Es bleibt offen, ob reale Verkehrsteilnehmer dieselbe Unterscheidung von kooperativem und nicht kooperativem Verhalten vornehmen würden. Das kooperative Verhalten berücksichtigt die Kostenfunktion von jedem Teilnehmer in einer Gesamtkostenrechnung, dessen Wert es minimiert. Ob dieser Ansatz der Gesamtkostenminimierung tatsächlich zu vom Nutzer erwarteten Verhalten führt, ist durch Probandenstudien zu untersuchen. Darüber hin-

aus muss die Akzeptanz der Reziprozität ebenfalls Untersuchungsgegenstand sein: Wie lange dürfen kooperative Situationen zurückliegen, damit sie weiterhin eine Rolle für zukünftige Entscheidungen spielen? Wie viel sind unterschiedliche kooperative Manöver wert? Auch hier sind Probandenstudien ein mögliches Werkzeug, um diese und weitere Fragestellungen zu beantworten.

## 6.5 Zusammenfassung des Kapitels

Dieses Kapitel stellt Simulationsergebnisse zu den Methoden zur Beantwortung der drei Forschungsfragen vor. Zunächst werden die zwei Simulationsverfahren des SiL-Verfahrens und des HiL-Verfahrens beschrieben. Das SiL-Verfahren stellt eine Simulationsumgebung dar, in der auf Basis der Eingangswerte Ausgangswerte erzeugt und simuliert werden. Die Planbefolgung entspricht einer unter Laborbedingungen optimalen Befolgung. Das HiL-Verfahren verwendet dementgegen Fahrzeugmodelle und Aktuatoren zur Befolgung der Trajektorien, um einen geschlossenen Kreis zwischen Simulationsumgebung und Hardware herzustellen. Neben den Simulationsumgebungen werden Grundeinstellungen bezüglich der Fahrumgebung und der Fahrzeugklassen eingeführt. Die sich anschließenden Simulationen orientieren sich an den Anforderungen zu den jeweiligen Forschungsfragen und stellen die Eigenschaften und Grenzen der Methoden heraus. Für jede der Forschungsfragen werden zudem Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsaufgaben hinsichtlich der Erweiterung der bestehenden drei Forschungsfragen und für die Generierung neuer Forschungsfragen gegeben.

Es wird gezeigt, dass sich die kooperative Manöverplanung eignet, um eine unterschiedliche Anzahl von Fahrzeugen in verschiedenen Umgebungen für Sicherheit, Komfort und Effizienz einzusetzen. Außerdem wird die Berücksichtigung von Fahrerpräferenzen und Fahrzeugfähigkeiten untersucht. Prinzipbedingte Eigenschaften wie die nicht vorhandene Entkopplung, die Berechnung sicherer Endzustände und sicherer Trajektorien dorthin werden genauso herausgearbeitet wie die Möglichkeit, mit Mischverkehr, bestehend aus beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Teilnehmern, umzugehen. Ein abschließender simulativer Vergleich, der in derselben Simulationsumgebung mit bekannten Methoden aus dem Stand der Wissenschaft und Technik durchgeführt wird, zeigt, dass die Planer in identischen Situationen eine unterschiedliche Lösungsgüte aufweisen. Gerade in der Planung zu sicheren Endzustände und der dynamischen Planung der Trajektorien bestehen Vorteile der kooperativen Manöverplanung gegenüber dem Stand der Wissenschaft und Technik. Die kooperative Manöverplanung ist zur Berechnung von gemeinschaftlich optimalen, kooperativen Manöverplänen geeignet.

Untersuchungen zur kooperativen Abstimmung stellen die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten dar und weisen die Verwendbarkeit der kooperativen Abstimmung als Aufgabenkoordination des fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems nach. Dazu werden unterschiedliche Derivate gebildet, die sich je nach Anwendungsfall dynamisch erzeugen lassen. Bei der zentralen Variante der kooperativen Abstimmung plant lediglich ein Teilnehmer, während die anderen Beteiligten dem Plan ausschließlich zustimmen müssen. Die Peer-Variante lässt eine Beteiligung aller am Wahrnehmungs- und Bewertungsprozess zu, sodass eine größere Einflussnahme möglich wird. Größtmögliche Mitbestimmung liegt im dezentralen Prozess vor, in dem sich jeder Teilnehmer an allen Schritten beteiligen kann. Die kooperative Abstimmung eignet sich als Prozess von der Problemfeststellung bis hin zur gemeinsamen Durchführung kooperativer Manöver.

Schließlich zeigen Simulationen die Verwendbarkeit der Definition von kooperativem Verhalten, um kooperative Verhaltensweisen zu quantifizieren und von nicht kooperativem Verhalten zu unterscheiden. Dazu werden die Gesamtkosten unterschiedlicher Pläne in einer Situation analysiert. Es zeigt sich, dass Pläne, die nach der Definition von kooperativem Verhalten kleine Gesamtkosten zugewiesen bekommen, eher der Alltagserfahrung entsprechen als Pläne, die hohe Kosten aufweisen. Außerdem wird der Fairnessgedanke dargestellt, der dazu führt, dass das Wohl einzelner nicht über das Wohl anderer gestellt wird.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einem fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem zur gemeinschaftlichen kooperativen Auflösung von Konfliktsituationen. Dieses System kann helfen, Situationen aufzulösen, bei denen das Verhalten mehrerer Fahrzeuge zur unfallfreien Bewältigung des Konflikts koordiniert werden muss. Konflikte kommen aus dem Sicherheits-, dem Komfort- und dem Effizienzbereich.

Ziel der Arbeit ist die prototypische Entwicklung eines fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems. Zur Erreichung des Ziels werden **drei Themengebiete** abgegrenzt, die in **jeweils einer Forschungsfrage** formuliert sind. Diese beschäftigten sich mit der Definition von kooperativem Verhalten im Umfeld von fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystemen, der Entwicklung einer geeigneten Methode zur Aufgabenkoordination für mehrere Fahrzeuge und der Entwicklung einer Fahrmanöverkoordinationsmethode für die Planung von Trajektorien für mehrere Fahrzeuge. Zur Quantifizierung des Beantwortungsgrads der Forschungsfragen werden für jede die jeweiligen Anforderungen definiert.

Zu den definierten Forschungsfragen wird ein umfangreicher **Stand der Wissenschaft und Technik** aufgezeigt, der auf einer systematisch durchgeführten Literaturstudie basiert. Für die Forschungsfragen relevante Quellen werden zunächst in einem Überblick wertungsfrei dargestellt. Es schließt sich eine Zusammenfassung des Inhalts in Form von Erkenntnissen an, die eine Untersuchung der Relevanz für die jeweilige Forschungsfrage erlaubt. Wenn von kooperativem Verhalten gesprochen wird, ist keine eindeutige Definition vorhanden. Aus den Quellen lassen sich acht unterschiedliche Quasidefinitionen ableiten, die sich in ihren Kernpunkten teilweise deutlich voneinander unterscheiden und die zuvor formulierten Anforderungen nicht erfüllen. Die Aufgabenkoordination mehrerer Teilnehmer wird von fünf unterschiedlichen Vorschlägen behandelt, wobei sich die Vorschläge auf die Lösung einzelner Probleme konzentrieren und die weiter gefassten Anforderungen der zweiten Forschungsfrage nicht erfüllen. Im Bereich der Fahrmanöverkoordination wird deutlich, dass sich nach dem Bereich der Luft- und Raumfahrt die meisten Quellen mit den straßengebundenen Fahrzeugen beschäftigten. Im Bereich der straßengebundenen Fahrzeuge befassen sich Anwendungen mit dem Cooperative ACC, dem Platooning oder der Unfallvermeidung. Aus den verwendeten neun Methoden lassen sich sechs prinzipiell für die dritte Forschungsfrage relevante Methoden identifizieren, wobei keine die Anforderungen gänzlich erfüllt. Aus dem Stand der Wissenschaft und Technik werden die Methoden mit der größten Relevanz in den zugehörigen Kapiteln wieder aufgegriffen und als Vergleichskonzepte zur Bewertung des Neuigkeitswerts herangezogen.

Die erste Forschungsfrage wird mit der **Definition von kooperativem Verhalten** beantwortet. Zu deren Herleitung werden sechs Thesen des kooperativen Verhaltens aufgestellt, die in notwendige und hinreichende Bedingungen zum Auftreten von kooperativem Verhalten überführt werden. Diese Bedingungen münden in einer vorläufigen Definition, die in einem Nutzendiagramm grafisch illustriert wird. Schließlich wird mit der Fairness ein wichtiger Punkt für die Akzeptanz und Ausgeglichenheit des Systems beschrieben. Die Erfüllung aller Anforderungen und der Neuigkeitswert der neu entwickelten Definition kooperativen Verhaltens werden aufgezeigt. Mit der neuen Definition von kooperativem Verhalten ist es möglich, ein Verhalten mithilfe eines quantifizierbaren Nutzens in egoistisch-kooperative, altruistisch-kooperative und rational-kooperative Verhaltensweisen auf der einen und unkooperative Verhaltensweisen auf der anderen Seite zu unterteilen.

Die kooperative Abstimmung wird als Methode für die **Aufgabenkoordination** entwickelt. Hierfür wird eine deliberative Steuerungsarchitektur zu einer vernetzten Steuerungsarchitektur erweitert. Anpassungen betreffen die Schnittstellen der Module innerhalb der Fahrzeuge und eine Definition neuer V2V-Nachrichten für einen In-

formationsaustausch über die Fahrzeuggrenzen hinweg. Die kooperative Abstimmung ermöglicht eine zentrale, dezentrale und gemeinschaftliche Lösung von Problemen. Dabei wird die Autonomie gewahrt und die sichere Durchführung berücksichtigt. Der Vergleich mit den Methoden des Stands der Wissenschaft und Technik zeigt den Neuigkeitswert der kooperativen Abstimmung, die auch die an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

Als Antwort auf die dritte Forschungsfrage wird die kooperative Manöverplanung als Methode der **Fahrmanöverkoordination** entwickelt. Das Grundprinzip der kooperativen Manöverplanung ist die Erzeugung von fahrzeugübergreifenden, sicheren Plänen, die aus sicheren Endzuständen und sicheren dorthin führenden Trajektorien für jeden Teilnehmer bestehen. Die Pläne beinhalten ausschließlich technisch realisierbare Fahrzeugbewegungen, da sie die Fähigkeiten der Fahrzeuge berücksichtigen. Die anschließende Bewertung der sicheren Pläne kann fahrerspezifisch hinsichtlich der Aspekte Sicherheit, Komfort und Effizienz parametrisiert werden. Dadurch können Präferenzen der Fahrer explizit berücksichtigt werden. Die Bewertung findet auf Basis der Fuzzy-Methode statt, die es erlaubt, den Fahrerwunsch in finale Kosten der Pläne umzuwandeln. Durch geeignete Maßnahmen wird sichergestellt, dass durch die Verwendung von Fuzzy-Methoden keine Kollisionen oder andere unerwünschten Nebeneffekte auftreten können. Wegen des während der Einführungsphase des Systems zu erwartenden Mischverkehrs wird auf die Möglichkeit des Umgangs mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern speziell eingegangen. Die kooperative Manöverplanung erfüllt alle an sie gestellten Anforderungen und zeigt auch im Vergleich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik ihren Neuigkeitswert.

Simulationen in einer Software-in-the-Loop (SiL) und einer Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulationsumgebung zeigen **Ergebnisse**, die mit den erarbeiteten Methoden erzielt werden. So wird die Funktionsweise der Methoden in unterschiedlichen Szenarien dargestellt und die Erfüllung von Anforderungen simulativ nachgewiesen. Die kooperative Manöverplanung ist in der Lage, die Planung für unterschiedlich viele Fahrzeuge in verschiedenen Umgebungen in Konfliktsituationen bezüglich Sicherheit, Komfort und Effizienz durchzuführen. Die Berechnungszeit hängt dabei neben dem Szenario stark von der gewählten Parametrisierung ab. So kann die Methode bei einer Auswahl an Parametersätzen mit dem größten Parametersatz bereits nach einer Rechenzeit von 9 ms Lösungen finden. Ein Vergleich hinsichtlich der Lösungsgüte des größten Parametersatzes zeigt, dass er für 84,3 % von 329.033 Fällen eine Lösung findet. Schließlich ist die Methode im HiL-Verfahren erprobt und in der Lage, entsprechend ausgerüstete Fahrzeug in der Simulation konfliktfrei zu planen. Der Vergleich mit dem Stand der Wissenschaft und Technik zeigt zudem, dass Situationen existieren, die die kooperative Manöverplanung konfliktfrei auflöst, obwohl bekannte Lösungen keine unfallvermeidende Strategie errechnen können. Dies liegt vor allem an der prinzipbedingten Planung in sichere Endzustände und einer dynamischen Trajektoriengenerierung, was ein Vorteil gegenüber den bekannten Methoden ist. Die kooperative Manöverplanung beantwortet somit die Forschungsfrage nach einer geeigneten Methode zur Fahrmanöverkoordination. Die kooperative Abstimmung erlaubt das flexible Wahrnehmen von Aufgaben, die im Rahmen der Konfliktlösung anfallen. Es werden mit der zentralen, der dezentralen und der gemeinsamen Konfliktlösung drei Ausprägungen der kooperativen Abstimmung untersucht. Sie stellt somit die Antwort auf die Forschungsfrage nach einer geeigneten Methode zur Aufgabenkoordination dar. Schließlich wird gezeigt, dass die Definition von kooperativem Verhalten eine Einordnung von kooperativem Verhalten ermöglicht, die den Beteiligten in Konfliktsituationen eine Einteilung nach kooperativem und nicht kooperativem Verhalten erlaubt. Der Nutzen/die Kosten spielen dabei eine entscheidende Rolle und werden in einer ausgewählten Situation genauer untersucht. In ihr zeigt sich, dass die Definition sinnvolle Lösungen mit niedrigen Gesamtkosten - also kooperative Lösungen - und nicht sinnvolle Lösungen mit hohen Gesamtkosten - also unkooperative Lösungen - hervorbringt. Die neue Definition von kooperativem Verhalten beantwortet damit die Forschungsfrage nach einer geeigneten Definition von kooperativem Verhalten.

Bezüglich der **Zielerreichung** kann festgehalten werden, dass die drei Forschungsfragen und die zugehörigen Anforderungen durch das erarbeitete System erfüllt werden. Mitschnitte von ersten Tests in Realfahrzeugen (Abbildung 7.1 und im Anhang in Abschnitt A.10) zeigen zudem, dass das System auch über die Simulationsgrenzen hinweg einsetzbar ist.





Abbildung 7.1: Das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem zur Vermeidung eines Unfalls mit einem aus der Verdeckung tretenden Fußgänger im Einsatz in Realfahrzeugen.

Die Simulationen der Methoden zeigen, dass **Erweiterungen der Forschungsfragen** möglich sind. Hinsichtlich der Definition von kooperativem Verhalten bleibt offen, ob diese Definition das Empfinden von kooperativem oder nicht kooperativem Verhalten von realen Probanden abbildet. Besteht ein situatives Empfinden der Insassen zur Einschätzung von kooperativem Verhalten? Ist dieses in einer Kostenfunktion abbildbar? Auch hinsichtlich der kooperativen Abstimmung haben bisher keine Untersuchungen stattgefunden, die den Übertragungskanal und die Häufigkeit der Wiederholung von Nachrichten adressieren. Können Nachrichten durch implizite Zusagen weggelassen werden? Was passiert, wenn ein Fahrzeug in die Lösung mehrerer Konflikte gleichzeitig involviert ist? Auch bezüglich der kooperativen Manöverplanung verbleibt Forschungsbedarf. So besteht die Möglichkeit, Einstellungen der Kostenfunktion, also der Parameter eines jeden Kostenterms, durch Probandenstudien abzusichern. Zwar wird eine Parameterstudie bezüglich der Sensitivität der Methode durchgeführt, jedoch liegt kein Fokus auf der Sensitivität der Eingangsdaten. Die Einflüsse von Sensorungenauigkeiten werden nur rudimentär untersucht [58]. Schließlich beschränken sich Szenarien auf Situationen des Längsverkehrs mit gerader Fahrzeugausrichtung. Einen nächsten Schritt stellen die Aufweichung der restriktiven Anfangsbedingungen und eine Erweiterung der kooperativen Manöverplanung zur Verwendung in Querverkehrsszenarien dar.

Des Weiteren bestehen **Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsaktivitäten**, die über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinausgehen. Die vorgestellten Methoden sind für den Einsatz in einem Realfahrzeug durch Simulation im HiL-Verfahren vorbereitet und wurden in einer prototypischen Umsetzung implementiert. Die Portierung muss jedoch für einen dauerhaften Einsatz deutlich robuster gestaltet werden. Außerdem ist ein Konzept für die Mensch-Maschine-Interaktion notwendig, welches das kooperative Verhalten der automatischen Fahrzeuge für einen Menschen transparent aufzeigt. Für die spätere Markteinführung ist es unabdingbar, dass sich Fahrzeuge unterschiedlicher OEMs miteinander abstimmen können. Ebenso müssen Grundlagen für das Aufbauen eines kollektiven Umfeldmodells und der sich anschließenden Überwachung der kooperativen Fahrmanöver geschaffen werden, damit die Vision eines fahrzeugübergreifenden kooperativen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems Realität wird. Somit kann dieses System dazu beitragen, dass einerseits das Autofahren effizienter und komfortabler wird und andererseits die Vision Zero, das Verkehrssystem ohne Getötete, Realität wird.



# Anhang

## A.1 Kontrollparadigmen

Steuerungsarchitekturen von Automaten lassen sich durch vier unterschiedliche Kontrollparadigmen abbilden. Dabei handelt es sich um eine deliberative, eine reaktive, eine verhaltensbasierte und eine hybride Architektur aus einer deliberativen und reaktiven Steuerungsarchitektur. Die Informationen sind den folgenden Quellen entnommen und bieten weitere Einblicke für den interessierten Leser [27, 146, 168, 242].

Die **deliberative Steuerungsarchitektur** ist die älteste unter den Kontrollparadigmen. Bei ihr wird die Umgebung mithilfe von Sensoren erfasst (*Sense*), eine Lösung mittels einer Planungseinheit errechnet (*Plan*) und dieser Plan an die Aktoren zur Durchführung weitergeleitet (*Act*). Daher wird dieses Paradigma auch als *Sense-Plan-Act* bezeichnet. Die auf einer Modellierung der Umgebung basierte Architektur kann optimale Lösungen finden, wobei die Lösungsgüte stark von der Qualität des Modells der Umgebung abhängt. Die aufwändige, symbolische Modellierung der Umgebung ist neben der Reaktion auf unerwartete, kurzzeitige Veränderungen in dynamischen Umgebungen als einer der Nachteile zu nennen.

Die **reaktive Steuerungsarchitektur** kann als eine Antwort auf die Trägheit des deliberativen Kontrollparadigmas verstanden werden. Dabei wird die Planungseinheit gestrichen und die durch die Sensoren wahrgenommene Umgebung (*Sense*) direkt in Steuerungsgrößen an den Aktoren überführt (*Act*). Somit ergibt sich die als *Sense-Act* bezeichnete Architektur, die eine Modellierung der Umgebung für das Erzeugen eines Verhaltens überflüssig macht. Sie orientiert sich an Reflexen und ist damit wie ihre biologischen Vorbilder sehr schnell. Nachteilig ist, dass sie ohne Planungseinheit nicht in der Lage ist, komplexe Verhaltensweisen durchzuführen.

Eine **verhaltensbasierte Steuerungsarchitektur** ist wiederum eine Weiterentwicklung der reaktiven. Sie besitzt ebenfalls keine zentrale Planungseinheit, wird aber um einen Koordinator erweitert (*Coordinate*). Dieser bildet eine Zwischenebene zwischen der Wahrnehmung (*Sense*) und der Durchführung (*Act*). Man könnte dieses Kontrollparadigma entsprechend der vorherigen Bezeichnungen mit *Sense-Coordinate-Act* beschreiben. Der Koordinator sorgt für eine Filterung der unterschiedlichen möglichen Verhalten. Da sowohl widerspruchsfreie als auch widersprüchliche Verhalten durch die Umgebung angeregt werden können, entstehen einerseits grundlegende Verhaltensweisen wie bei einer reaktiven Architektur und andererseits erweiterte, aus mehreren Verhalten bestehende Verhaltensweisen. Somit ist die Steuerungsarchitektur beim Ausfall einzelner Verhalten nicht gänzlich außer Kraft gesetzt. Die fehlende Planungseinheit erschwert die Durchführung von längerfristigen Verhaltensweisen jedoch deutlich.

Die **hybride Steuerungsarchitektur** vereint eine deliberative mit einer reaktiven Architektur. Langfristige Pläne werden von der Planungseinheit des deliberativen Teils, kurzfristige Aktionen vom reaktiven Teil durchgeführt. Somit können sowohl langfristige Pläne als auch kurzfristige Reaktionen erzeugt werden. Jedoch stellt die Koordination dieser beiden Teile auch die größte Herausforderung dar. Daher wird oftmals eine koordinierende Ebene zwischen den beiden Teilen platziert.

## A.2 Planungsmethoden und deren Anwendung

Tabelle A.1: Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen für den Bereich Luft- und Raumfahrt.

	Koordinationsmethoden								
	Optimalsteuerungsproblem	Reglergesetze	(virtuelles) Leader-Follower	verhaltensbasierter Ansatz	hierarchischer Ansatz	gerichtete Graphen	Potenzialfeld	elastisches Band	Zustandsautomat
Formationsflug	[284]	[92, 137, 142, 203, 246, 265]	[102, 148, 153, 284, 303]	[132]		[82]	[112]		
Täuschen von Radarstationen	[166, 235]	[192, 200]							
Angreifen von Zielen	[107, 135, 172, 322]	[23, 325]		[17]	[33, 34, 90]				
Erstellen und Auflösen von Formationen		[77, 142]							
Erreichen von Zielpunkten	[6, 95, 138]				[199]				
Suchen/Jagen von Zielen	[91, 233, 322]	[15, 36, 40, 71, 325]	[329]	[225]	[314]				
Starten & Landen auf Flugzeugträger	[135]								
Patrouillieren eines Areal	[252]								
Gebiets-erkundung			[312]						
Unfallvermeidung von Flugzeugen	[20]	[249]							[5]

Anmerkung: Bei Quellen derselben Forschergruppe und desselben Inhalts wird lediglich eine Quelle in der Tabelle angegeben. So steht Quelle [246] auch für Quelle [247] und [245], Quelle [77] für Quelle [76] und [78], Quelle [137] für Quelle [136], Quelle [142] für Quelle [141], Quelle [192] für Quelle [191] und Quelle [225] für Quelle [224].

Tabelle A.2: Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich der Nautik.

	Koordinationsmethoden								
	Optimalsteuerungsproblem	Reglergesetze	(virtuelles) Leader-Follower	verhaltensbasierter Ansatz	hierarchischer Ansatz	gerichtete Graphen	Potenzialfeld	elastisches Band	Zustandsautomat
Formationsfahrt		[26, 98–100, 215, 232, 266]	[55, 228, 287, 297, 316, 328]						[315]
Gebiets- erkundung	[129]	[226]		[157]			[109]		[122, 198, 319]
Klassifizierung unbek. Objekte				[45, 124]					
Bewegen von Objekten				[326]					
Halten von Objekten		[279]							
Überwachung von stationären Zielen					[22]				
Patrouillieren					[22]				

Tabelle A.3: Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich der Robotik.

	Koordinationsmethoden								
	Optimalsteuerungsproblem	Reglergesetze	(virtuelles) Leader-Follower	verhaltensbasierter Ansatz	hierarchischer Ansatz	gerichtete Graphen	Potenzialfeld	elastisches Band	Zustandsautomat
Formations-fahrt/-flug	[89]	[3, 53, 105, 140, 162, 244, 267, 286]	[2, 39, 44, 75, 182, 196, 220, 237, 239, 277, 320]				[221]		[50, 217]
Heben/Transportieren einer Last		[276, 281, 282, 298]	[65, 86, 321]						
Sortierung von Paketen		[184]							
Kostenfunktion minimieren	[260]								
Optimale Trajektorie finden	[262]								
Zielpunkt anfahren		[31, 323]							
Zone verteidigen	[62]								
Gebiets-erkundung					[219]				[173]
Angreifen		[88]							
Suchen				[280]					

Anmerkung: Bei Quellen derselben Forschergruppe und desselben Inhalts wird lediglich eine Quelle in der Tabelle angegeben. So steht Quelle [184] auch für [185], Quelle [53] für Quelle [52], Quelle [162] für die Quellen [161] und [160] und Quelle [282] für Quelle [318].

Tabelle A.4: Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich der landgebundenen Fahrzeuge.

	Koordinationsmethoden								
	Optimalsteuerungsproblem	Reglergesetze	(virtuelles) Leader-Follower	verhaltensbasierter Ansatz	hierarchischer Ansatz	gerichtete Graphen	Potenzialfeld	elastisches Band	Zustandsautomat
Formationsfahrt		[96, 202, 317]	[170, 171, 264]		[222]		[69, 170]		
Bewegen in unbekannten Gebieten							[37]		
Suche von Objekten			[38]				[214]		
Gebiets-erkundung									[83]
Unfallvermeidung	[251]	[250, 278]							

Anmerkung: Bei Quellen derselben Forschergruppe und desselben Inhalts wird lediglich eine Quelle in der Tabelle angegeben. So steht Quelle [96] auch für Quelle [97].

Tabelle A.5: Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich des Verkehrsmanagements.

	Koordinationsmethoden								
	Optimalsteuerungsproblem	Reglergesetze	(virtuelles) Leader-Follower	verhaltensbasierter Ansatz	hierarchischer Ansatz	gerichtete Graphen	Potenzialfeld	elastisches Band	Zustandsautomat
Koordination von Lichtsignalanlagen an Knotenpunkten	[119, 165, 167, 188, 234, 327]	[126, 177, 201, 254, 301, 302]				[106]			
Zuflussregelungsanlagen	[181]	[117, 125, 134]							
Ausfahrten-/Mautstellenregelung							[41]		[174]
Steuerung von Hauptverkehrsströmen	[186, 236]				[130, 150]				
Bremswellenminderung		[118]							
Koordination an Engstellen	[285]								

Anmerkung: Bei Quellen derselben Forschergruppe und desselben Inhalts wird lediglich eine Quelle in der Tabelle angegeben. So steht Quelle [186] auch für Quelle [187] und Quelle [150] für Quelle [263].



Tabelle A.6: Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich der straßengebundenen Fahrzeuge.

	Koordinationsmethoden								
	Optimalsteuerungsproblem	Reglergesetze	(virtuelles) Leader-Follower	verhaltensbasierter Ansatz	hierarchischer Ansatz	gerichtete Graphen	Potenzialfeld	elastisches Band	Zustandsautomat
Formationsfahrt	[131]	[111, 139, 143, 227, 289]	[313]						[159, 190, 204]
Vermeidung von Unfällen	[84]	[43]				[84, 176, 179]		[84]	
CACC		[42, 46, 108, 113, 144, 145, 147, 180, 208, 212, 213, 216, 261, 268, 293]				[331]			[29, 101, 133, 189, 193, 195, 206]

Anmerkung: Bei Quellen derselben Forschergruppe und desselben Inhalts wird lediglich eine Quelle in der Tabelle angegeben. So steht Quelle [84] auch für Quelle [85], Quelle [176] für die Quelle [175] und [178], Quelle [289] für [288] und Quelle [204] für Quelle [94].

### A.3 Fallanalyse Zielpunktberechnung

Die Fallanalyse wird notwendig, da sich der Gegenlenkzeitpunkt in Abhängigkeit der Start- und Endbedingungen errechnet. Dazu kommt der im Allgemeinen nicht differenzierbare Verlauf des Fahrradius  $r$ , welcher durch die Limitierung des Wendekreises entsteht. Dies sorgt für insgesamt sieben Fälle. Die Variablennamen orientieren an den in Unterabschnitt 5.2.1 verwendeten. Ausgehend vom Grundintegral werden die sieben Fälle gelöst:

$$\int_{t_0}^{t_{GL}} \psi(t) dt = \int_{t_{GL}}^{t_1} \psi(t) dt \quad (\text{A.1})$$

**Fall A:**

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{v_0}{r} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{v_0}{r} dt \\ \int_{t_0}^{t_{GL}} 1 dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} 1 dt \\ t_{GL} &= \frac{t_0 + t_1}{2} \end{aligned}$$

**Fall B:**

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{v(t)}{r(t)} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{v(t)}{r(t)} dt \\ \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \cdot a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)^2} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \cdot a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)^2} dt \\ \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{1}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{1}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)} dt \\ \left[ \frac{1}{a_{\text{Längs}}} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \right]_{t_0}^{t_{GL}} &= \left[ \frac{1}{a_{\text{Längs}}} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \right]_{t_{GL}}^{t_1} \\ \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_{GL} + v_0) &= \frac{\ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_0 + v_0) + \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_1 + v_0)}{2} \\ t_{GL} &= \frac{\sqrt{a_{\text{Längs}} \cdot t_0 + v_0} \cdot \sqrt{a_{\text{Längs}} \cdot t_1 + v_0} - v_0}{a_{\text{Längs}}} \end{aligned}$$

**Fall C:**

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{v(t)}{r(t)} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_{WK}} \frac{v(t)}{r(t)} dt + \int_{t_{WK}}^{t_1} \frac{v(t)}{r_{\min}} dt \\ \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \cdot a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)^2} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_{WK}} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \cdot a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)^2} dt + \int_{t_{WK}}^{t_1} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)}{r_{\min}} dt \\ \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)} dt &= \int_{t_{GL}}^{t_{WK}} \frac{a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)} dt + \int_{t_{WK}}^{t_1} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)}{r_{\min}} dt \\ \left[ \frac{a_{\text{Quer}}}{a_{\text{Längs}}} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \right]_{t_0}^{t_{GL}} &= \left[ \frac{a_{\text{Quer}}}{a_{\text{Längs}}} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \right]_{t_{GL}}^{t_{WK}} + \frac{1}{r_{\min}} \cdot \left[ \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right]_{t_{WK}}^{t_1} \\ \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_{GL} + v_0) &= \frac{a_{\text{Längs}}}{2 \cdot a_{\text{Quer}} \cdot r_{\min}} \cdot \left[ \left( \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t_1^2 + v_0 \cdot t_1 \right) - \left( \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t_{WK}^2 + v_0 \cdot t_{WK} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_{\text{WK}} + v_0) + \frac{1}{2} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t_0 + v_0) \\
t_{\text{GL}} = & \frac{1}{a_{\text{Längs}}} \cdot \left[ e^{\frac{a_{\text{Längs}}}{2 \cdot a_{\text{Quer}} \cdot r_{\text{min}}}} \cdot \left( \left( \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t_1^2 + v_0 \cdot t_1 \right) - \left( \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t_{\text{WK}}^2 + v_0 \cdot t_{\text{WK}} \right) \right) \right. \\
& \left. \cdot \sqrt{a_{\text{Längs}} \cdot t_0 + v_0} \cdot \sqrt{a_{\text{Längs}} \cdot t_{\text{WK}} + v_0} - v_0 \right]
\end{aligned}$$

**Fall D:**

$$\begin{aligned}
& \int_{t_0}^{t_{\text{WK}}} \frac{v(t)}{r(t)} dt + \int_{t_{\text{WK}}}^{t_{\text{GL}}} \frac{v(t)}{r_{\text{min}}} dt = \int_{t_{\text{GL}}}^{t_1} \frac{v(t)}{r_{\text{min}}} dt \\
& \int_{t_0}^{t_{\text{WK}}} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \cdot a_{\text{Quer}}}{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)^2} dt + \int_{t_{\text{WK}}}^{t_{\text{GL}}} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)}{r_{\text{min}}} dt = \int_{t_{\text{GL}}}^{t_1} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)}{r_{\text{min}}} dt \\
& \left[ \frac{a_{\text{Quer}}}{a_{\text{Längs}}} \cdot \ln(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0) \right]_{t_0}^{t_{\text{WK}}} + \\
& \frac{1}{r_{\text{min}}} \cdot \left[ \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right]_{t_{\text{WK}}}^{t_{\text{GL}}} = \frac{1}{r_{\text{min}}} \cdot \left[ \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right]_{t_{\text{GL}}}^{t_1} \\
& \underbrace{\frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot (t_1^2 + t_{\text{WK}}^2) + v_0 \cdot (t_1 + t_{\text{WK}})}_{=\alpha_1} + \\
& \underbrace{\frac{r_{\text{min}} \cdot a_{\text{Quer}}}{a_{\text{Längs}}} \cdot \ln \left( \frac{a_{\text{Längs}} \cdot t_{\text{WK}} + v_0}{a_{\text{Längs}} \cdot t_0 + v_0} \right)}_{=\alpha_2} = 2 \cdot \left( \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t_{\text{GL}}^2 + v_0 \cdot t_{\text{GL}} \right) \\
& \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{a_{\text{Längs}}} = t_{\text{GL}}^2 + 2 \cdot \frac{v_0}{a_{\text{Längs}}} \cdot t_{\text{GL}} \\
& t_{\text{GL}1,2} = -\frac{v_0}{a_{\text{Längs}}} \pm \sqrt{\left( \frac{v_0}{a_{\text{Längs}}} \right)^2 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{a_{\text{Längs}}}}
\end{aligned}$$

**Fall E:**

$$\begin{aligned}
& \int_{t_0}^{t_{\text{GL}}} \frac{v(t)}{r_{\text{min}}} dt = \int_{t_{\text{GL}}}^{t_1} \frac{v(t)}{r_{\text{min}}} dt \\
& \int_{t_0}^{t_{\text{GL}}} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)}{r_{\text{min}}} dt = \int_{t_{\text{GL}}}^{t_1} \frac{(a_{\text{Längs}} \cdot t + v_0)}{r_{\text{min}}} dt \\
& \left[ \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right]_{t_0}^{t_{\text{GL}}} = \left[ \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right]_{t_{\text{GL}}}^{t_1} \\
& 2 \cdot \left( \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t_{\text{GL}}^2 + v_0 \cdot t_{\text{GL}} \right) = \underbrace{\left( \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t_0^2 + v_0 \cdot t_0 \right) + \left( \frac{a_{\text{Längs}}}{2} \cdot t_1^2 + v_0 \cdot t_1 \right)}_{=\alpha_3} \\
& t_{\text{GL}}^2 + \frac{2 \cdot v_0}{a_{\text{Längs}}} \cdot t_{\text{GL}} = \frac{\alpha_3}{a_{\text{Längs}}} \\
& t_{\text{GL}1,2} = -\frac{v_0}{a_{\text{Längs}}} \pm \sqrt{\left( \frac{v_0}{a_{\text{Längs}}} \right)^2 + \frac{\alpha_3}{a_{\text{Längs}}}}
\end{aligned}$$

**Fall F:**

$$\int_{t_0}^{t_{\text{WK}}} \frac{v(t)}{r_{\text{min}}} dt + \int_{t_{\text{WK}}}^{t_{\text{GL}}} \frac{v(t)}{r(t)} dt = \int_{t_{\text{GL}}}^{t_1} \frac{v(t)}{r(t)} dt$$

$$\begin{aligned}
& \int_{t_0}^{t_{WK}} \frac{a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0}{r_{\min}} dt + \int_{t_{WK}}^{t_{GL}} \frac{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0) \cdot a_{Quer}}{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0)^2} dt = \int_{t_{GL}}^{t_1} \frac{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0) \cdot a_{Quer}}{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0)^2} dt \\
& \frac{1}{r_{\min}} \cdot \left[ \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right]_{t_0}^{t_{WK}} + \left[ \frac{a_{Quer}}{a_{L\ddot{a}ngs}} \cdot \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0) \right]_{t_{WK}}^{t_{GL}} = \left[ \frac{a_{Quer}}{a_{L\ddot{a}ngs}} \cdot \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0) \right]_{t_{GL}}^{t_1} \\
& \frac{1}{r_{\min}} \cdot \left[ \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot (t_{WK}^2 - t_0^2) + v_0 \cdot (t_{WK} - t_0) \right] + \\
& \frac{a_{Quer}}{a_{L\ddot{a}ngs}} \cdot [\ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_{GL} + v_0) - \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_{WK} + v_0)] = \frac{a_{Quer}}{a_{L\ddot{a}ngs}} \cdot [\ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_1 + v_0) \\
& \quad - \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_{GL} + v_0)] \\
& - \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2 \cdot a_{Quer} \cdot r_{\min}} \cdot \left[ \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot (t_{WK}^2 - t_0^2) + v_0 \cdot (t_{WK} - t_0) \right] \\
& + \frac{1}{2} \cdot \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_{WK} + v_0) + \frac{1}{2} \cdot \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_1 + v_0) = \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_{GL} + v_0) \\
& \frac{1}{a_{L\ddot{a}ngs}} \cdot \left[ e^{\frac{-a_{L\ddot{a}ngs}}{2 \cdot a_{Quer} \cdot r_{\min}} \cdot \left( \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot (t_{WK}^2 - t_0^2) + v_0 \cdot (t_{WK} - t_0) \right)} \cdot \sqrt{a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_1 + v_0} \right. \\
& \quad \left. \cdot \sqrt{a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_{WK} + v_0} - v_0 \right] = t_{GL}
\end{aligned}$$

**Fall G:**

$$\begin{aligned}
& \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{v(t)}{r_{\min}} dt = \int_{t_{GL}}^{t_{WK}} \frac{v(t)}{r_{\min}} dt + \int_{t_{WK}}^{t_1} \frac{v(t)}{r(t)} dt \\
& \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0)}{r_{\min}} dt = \int_{t_{GL}}^{t_{WK}} \frac{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0)}{r_{\min}} dt + \int_{t_{WK}}^{t_1} \frac{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0) \cdot a_{Quer}}{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0)^2} dt \\
& \int_{t_0}^{t_{GL}} \frac{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0)}{r_{\min}} dt = \int_{t_{GL}}^{t_{WK}} \frac{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0)}{r_{\min}} dt + \int_{t_{WK}}^{t_1} \frac{a_{Quer}}{(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0)} dt \\
& \frac{1}{r_{\min}} \cdot \left[ \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right]_{t_0}^{t_{GL}} = \frac{1}{r_{\min}} \cdot \left[ \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right]_{t_{GL}}^{t_{WK}} + \left[ \frac{a_{Quer}}{a_{L\ddot{a}ngs}} \cdot \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t + v_0) \right]_{t_{WK}}^{t_1} \\
& \left[ 2 \cdot \left( \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot t_{GL}^2 + v_0 \cdot t_{GL} \right) \right] = \underbrace{\left( \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot t_{WK}^2 + v_0 \cdot t_{WK} \right) + \left( \frac{a_{L\ddot{a}ngs}}{2} \cdot t_0^2 + v_0 \cdot t_0 \right)}_{=\alpha_4} + \\
& \quad \underbrace{\frac{a_{Quer} \cdot r_{\min}}{a_{L\ddot{a}ngs}} [\ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_1 + v_0) - \ln(a_{L\ddot{a}ngs} \cdot t_{WK} + v_0)]}_{=\alpha_5} \\
& t_{GL}^2 + \frac{2 \cdot v_0}{a_{L\ddot{a}ngs}} \cdot t_{GL} = \frac{\alpha_4 + \alpha_5}{a_{L\ddot{a}ngs}} \\
& t_{GL} = -\frac{v_0}{a_{L\ddot{a}ngs}} \cdot \pm \sqrt{\left( \frac{v_0}{a_{L\ddot{a}ngs}} \right)^2 + \frac{\alpha_4 + \alpha_5}{a_{L\ddot{a}ngs}}}
\end{aligned}$$

## A.4 Berechnung des Umschaltzeitpunkts

Mit  $s_0 = t_0 = 0$  ergeben sich die vier Gleichungen:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & v_U = a_{U1} \cdot t_U + v_0 \\
 2) \quad & s_U = \frac{1}{2} \cdot a_{U1} \cdot t_U^2 + v_0 \cdot t_U \\
 3) \quad & v_1 = a_{U2} \cdot (T - t_U) + v_U \\
 4) \quad & s_1 = \frac{1}{2} \cdot a_{U2} \cdot (T - t_U)^2 + v_U \cdot (T - t_U) + s_U
 \end{aligned}$$

$$1') \quad a_{U1} = \frac{v_U - v_0}{t_U}$$

$$1') \text{ in } 2) \quad s_U = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_U - v_0}{t_U} \cdot t_U^2 + v_0 \cdot t_U$$

$$s_U - v_0 \cdot t_U = \frac{1}{2} \cdot (v_U - v_0) \cdot t_U$$

$$2') \quad v_U = \frac{(2 \cdot s_U - 2 \cdot v_0 \cdot t_U)}{t_U} + v_0 = \frac{2 \cdot s_U}{t_U} - v_0$$

$$3') \quad a_{U2} = \frac{v_1 - v_U}{T - t_U}$$

$$2') \text{ in } 3') \quad a_{U2} = \frac{v_1 - \left( \frac{2 \cdot s_U}{t_U} - v_0 \right)}{T - t_U}$$

$$2') \& 3') \text{ in } 4) \quad s_1 = \frac{v_1 - \left( \frac{2 \cdot s_U}{t_U} - v_0 \right)}{2 \cdot (T - t_U)} \cdot (T - t_U)^2 + \left( \frac{2 \cdot s_U}{t_U} - v_0 \right) \cdot (T - t_U) + s_U$$

$$s_1 - s_U = \left( v_1 - \left( \frac{2 \cdot s_U}{t_U} - v_0 \right) \right) \cdot \frac{(T - t_U)}{2} + \left( \frac{2 \cdot s_U}{t_U} - v_0 \right) \cdot (T - t_U)$$

$$s_1 - s_U = \left( \frac{v_1}{2} - \frac{s_U}{t_U} + \frac{v_0}{2} \right) \cdot (T - t_U) + \frac{2 \cdot s_U \cdot T}{t_U} - \frac{2 \cdot s_U \cdot t_U}{t_U} - v_0 \cdot T + v_0 \cdot t_U$$

$$s_1 - s_U = \frac{v_1 \cdot T}{2} - \frac{v_1 \cdot t_U}{2} - \frac{s_U \cdot T}{t_U} + s_U + \frac{v_0 \cdot T}{2} - \frac{v_0 \cdot t_U}{2} + \frac{2 \cdot s_U \cdot T}{t_U} - 2 \cdot s_U - v_0 \cdot T + v_0 \cdot t_U$$

$$s_1 - s_U = \frac{v_1 \cdot T}{2} - \frac{v_1 \cdot t_U}{2} + \frac{s_U \cdot T}{t_U} - s_U - \frac{v_0 \cdot T}{2} + \frac{v_0 \cdot t_U}{2}$$

$$-\frac{s_U \cdot T}{t_U} = \frac{v_1 \cdot T}{2} - \frac{v_1 \cdot t_U}{2} - \frac{v_0 \cdot T}{2} + \frac{v_0 \cdot t_U}{2} - s_1$$

$$-s_U \cdot T = \frac{v_1 \cdot T \cdot t_U}{2} - \frac{v_1 \cdot t_U^2}{2} - \frac{v_0 \cdot T \cdot t_U}{2} + \frac{v_0 \cdot t_U^2}{2} - s_1 \cdot t_U$$

$$-s_U \cdot T = t_U^2 \cdot \left( \frac{v_0}{2} - \frac{v_1}{2} \right) + t_U \cdot \left( \frac{v_1 \cdot T}{2} - \frac{v_0 \cdot T}{2} - s_1 \right)$$

$$0 = t_U^2 \cdot (v_0 - v_1) + t_U \cdot (T \cdot (v_1 - v_0) - 2 \cdot s_1) + 2 \cdot s_U \cdot T$$

$$t_{U1,2} = -\frac{\frac{T}{2} \cdot (v_1 - v_0) - s_1}{v_0 - v_1} \pm \sqrt{\left( \frac{\frac{T}{2} \cdot (v_1 - v_0) - s_1}{v_0 - v_1} \right)^2 - \frac{2 \cdot s_U \cdot T}{v_0 - v_1}}$$

## A.5 Berechnung der Beschleunigungen

$$1) \quad v_U = a_{U1} \cdot t_U + v_0$$

$$2) \quad s_U = \frac{1}{2} \cdot a_{U1} \cdot t_U^2 + v_0 \cdot t_U$$

$$3) \quad v_1 = a_{U2} \cdot (T - t_U) + v_U$$

$$4) \quad s_1 = \frac{1}{2} \cdot a_{U2} \cdot (T - t_U)^2 + v_U \cdot (T - t_U) + s_U$$

$$1) \text{ in } 3) \quad v_1 = a_{U2} \cdot (T - t_U) + a_{U1} \cdot t_U + v_0$$

$$3') \quad a_{U1} = \frac{v_1 - v_0 - a_{U2} \cdot (T - t_U)}{t_U}$$

$$3') \text{ in } 2) \quad s_U = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_1 - v_0 - a_{U2} \cdot (T - t_U)}{t_U} \right) \cdot t_U^2 + v_0 \cdot t_U$$

$$2 \cdot s_U = (v_1 - v_0 - a_{U2} \cdot (T - t_U)) \cdot t_U + 2 \cdot v_0 \cdot t_U$$

$$-a_{U2} = \frac{\frac{2 \cdot s_U}{t_U} - 2 \cdot v_0 - v_1 + v_0}{T - t_U}$$

$$2') \quad a_{U2} = \frac{v_0 + v_1 - \frac{2 \cdot s_U}{t_U}}{T - t_U}$$

$$2') \text{ in } 3') \quad a_{U1} = \frac{v_1 - v_0 - \frac{v_0 + v_1 - \frac{2 \cdot s_U}{t_U}}{T - t_U} \cdot (T - t_U)}{t_U}$$

$$a_{U1} = \frac{v_1 - v_0 - v_0 - v_1 + \frac{2 \cdot s_U}{t_U}}{t_U}$$

$$a_{U1} = \frac{2 \cdot s_U - 2 \cdot v_0 \cdot t_U}{t_U^2}$$

---

## A.6 Einstellungen der Risikoanalyse

Die Risikoanalyse stellt sicher, dass weder die Trajektorien noch die Endzustände kollisionsbehaftet bzw. unsicher sind. Um sichere Trajektorien und sichere Endzustände zu definieren, sind einige Einstellungen vorzunehmen. So werden für die Fahrzeuge Sicherheitsabstände in Längs- bzw. Querrichtung angenommen, die die Geometrie der Fahrzeuge erweitert. In Längsrichtung beträgt der Sicherheitsabstand 0,5 m und in Querrichtung 0,2 m. Diese Sicherheitsabstände werden bei der Prüfung von Kollisionen zwischen zwei Objekten, also Fahrzeugen und stehenden Hindernissen, verwendet. Für sichere Endzustände kann die StVO nachgebildet werden, indem eine zulässige Höchstgeschwindigkeit, der Straßentyp, der Verkehrssinn und Verkehrsflächen definiert werden können. Die Höchstgeschwindigkeit und der Straßentyp wird entsprechend der Straßenumgebung aus Abschnitt 6.1.2 gesetzt. Mit dem Setzen von Rechtsverkehr als Verkehrssinn, dem Nichtbefahren von verbotenen Verkehrsflächen, dem Nichtverlassen der vorgegebenen Fahrbahn und der Beachtung von statischen und dynamischen Hindernissen werden die Einstellungen der Risikoanalyse komplettiert.

## A.7 Berechnung des empirischen Faktors $\zeta$

Der Faktor  $\zeta$  sorgt dafür, dass geschwindigkeitsabhängig Kosten für die laterale Annäherung an den Straßenrand entstehen. Die Berechnung des Faktors beruht auf den folgenden Überlegungen:

- Kosten sollen nur dann entstehen, wenn ein Fahrzeug bei der lateralen Annäherung einen unteren Grenzwert der Entfernung unterschreitet. Der Faktor hat nicht zum Ziel, die Fahrzeuge direkt auf der Fahrstreifenmitte zu halten.
- Die Fahrumgebung hat durch die Straßenbreite einen Einfluss auf den Faktor, da breitere Straßen mehr Spielraum für eine ungefährliche laterale Position bieten.
- Die Fahrzeugbreite hat einen Einfluss auf die Bewertung, ob eine Unterschreitung vorliegt oder nicht.
- Die Geschwindigkeit wird als Einflussgröße hinzugezogen, da bei höheren Geschwindigkeiten mehr lateraler Abstand zur Einhaltung einer sicheren Entfernung notwendig ist.

$$\zeta = \frac{\frac{b_S}{2} - \frac{b_{\text{Ego}}}{2} - D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}}}{D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}} \cdot v_{\text{Umgebung,max}}} - \frac{1}{v_{\text{Umgebung,max}}}$$

$b_S$  : Breite der Straße

$b_{\text{Ego}}$  : Breite des Fahrzeugs

$D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}}$  : Stillstandsquerabstand

$v_{\text{Umgebung,max}}$  : erlaubte Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs

Mit dieser Formel lässt sich der empirische Faktor  $\zeta$  berechnen. Als Werte werden die maximal zulässige Geschwindigkeit der Fahrumgebung und die Breite des 95-perzentil LKW eingesetzt und das Ergebnis abgerundet. Bei der Autobahn wird mit der Richtgeschwindigkeit von  $130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  gerechnet. Es ergeben sich die folgenden Werte:

$$\zeta_{\text{Stadt}} = 0,028$$

$$\zeta_{\text{Landstraße}} = 0,046$$

$$\zeta_{\text{Autobahn}} = 0,074$$

Die Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des Faktors  $\zeta$  wurde empirisch ermittelt. Er bildet die Einflussgrößen auf die Erzeugung von Querkosten ab. Es ist möglich, diese Kosten über andere Zusammenhänge zu berechnen. Außerdem kann der Faktor auch situationsadaptiv bestimmt werden.



## A.8 Einstellungen zur Kostenberechnung

Die Kostenfunktion spielt eine zentrale Rolle bei der Bewertung der Qualität unterschiedlicher Pläne. An dieser Stelle werden die für die Tests verwendeten Werte für die Einstellungen des in Abschnitt 5.3 beschriebenen Kostenfunktional aufgezählt. Dabei werden einerseits die verwendeten Fuzzy-Mengen definiert und andererseits die Verrechnung der Bewertungen, also der finalen Kosten, beschrieben. Die eingestellten Werte beruhen auf den Erfahrungen des Autors und sind nicht durch repräsentative Probandenstudien abgesichert.

Die verwendeten Fuzzy-Mengen sind einfachheitshalber identisch für alle Terme der Kostenfunktion aufgebaut. Es werden drei Zugehörigkeitsfunktionen (*gering*, *mittel*, *hoch*) definiert, die Werte im Intervall  $[0; 1]$  abbilden. Die Formeln A.2, A.3 und A.4 zeigen die zugrundeliegenden Gleichungen. Anhand der Gleichungen ergibt sich immer eine Summenzugehörigkeit über die drei Zugehörigkeitsfunktionen von 1. Abbildung A.1 zeigt die verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Logik grafisch.

$$\text{gering: } x \mapsto \begin{cases} \frac{0,5-x}{0,5} & \text{falls } 0 \leq x \leq 0,5 \\ 1 & \text{falls } x < 0 \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{mittel: } x \mapsto \begin{cases} \frac{x}{0,5} & \text{falls } 0 \leq x \leq 0,5 \\ \frac{1-x}{0,5} & \text{falls } 0,5 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{hoch: } x \mapsto \begin{cases} \frac{x-0,5}{0,5} & \text{falls } 0,5 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{falls } x > 1 \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Die finalen Kosten  $K^*$  eines Kostenterms ergeben sich als Summe der drei  $k = \{1,2,3\}$  Zugehörigkeitswerte  $\mu_k(x)$  multipliziert mit dem Zugehörigkeitsfaktor  $F_k$ .

$$K^* = \sum_{k=1}^3 F_k \cdot \mu_k(x) \quad (\text{A.5})$$

Tabelle A.7 zeigt die verwendeten Kostenfunktionen unterteilt nach Zielpunkt- und Trajektorienbewertung. Dabei werden für jede Kostenfunktion die verwendeten Einstellungen bezüglich einzustellender Parameter und die Zugehörigkeitsfaktoren aufgelistet.

Bei den Werten der verwendeten Einstellungen handelt es sich um eine subjektive Wahl für die Darstellung einiger Beispiellösungen. Im normalen Betrieb sollte die Wunschgeschwindigkeit durch den Fahrer gesetzt werden. Sie kann beispielsweise aus der Einstellung eines Tempomaten entnommen oder über Eingaben dem Fahrzeug mitgeteilt werden. In den untersuchten Fällen wird die letzte Geschwindigkeit vor dem Manöver als Wunschgeschwindigkeit gesetzt, da davon ausgegangen wird, dass der Fahrer sonst seine Geschwindigkeit entsprechend seines Wunsches angepasst hätte. Der Stillstands-längs-Abstand beschreibt die Entfernung zu anderen Objekten in Längsrichtung, für die keine Kosten im Stillstand entstehen. Für die angestellten Untersuchungen wird mit 4 m ein Stillstands-längs-Abstand von knapp unter einer PKW-Fahrzeu glänge angenommen. Ähnlich verhält es sich mit dem Stillstands-quer-Abstand, der ebenfalls durch den Fahrer zu definieren ist. Dieser sagt aus, ab welcher Querentfernung im Stillstand Kosten entstehen. Diesen Untersuchungen liegt ein Stillstands-quer-Abstand

Tabelle A.7: Verwendete Parametrierung des Kostenfunktional.

	Name des Kostenterms	verwendete Einstellungen	Zugehörigkeitsfaktoren		
			gering	mittel	hoch
Zielpunkt	Wunschgeschwindigkeit	$v_{\text{soll}}^{\text{Ego}} = v_0$	0	0,75	1
	Längsabstand	$d_{\text{sicher}}^{\text{Ego}} = 4 \text{ m}$	1	0,75	0
	Querabstand	$D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}} = 0,2 \text{ m}$	1	0,75	0
Trajektorie	Fahrkomfort	$F_L = 1; F_Q = 2$	1	0,75	0
	Verbrauch	-	0	0,75	1
	Längsabstand	$d_{\text{sicher}}^{\text{Ego}} = 4 \text{ m}$	1	0,75	0
	Querabstand	$D_{\text{sicher}}^{\text{Ego}} = 0,2 \text{ m}$	1	0,75	0
	Kammscher Reibungskreis	-	0	0,75	1
	Sicherheitsfaktor	-	1	1,5	3

von 0,2 m zugrunde. Zur Berechnung des Fahrkomforts müssen die Gewichtungsfaktoren der Längs- bzw. Querbeschleunigung gesetzt werden. Damit kann individuell auf eine unterschiedliche Bestrafung von auftretenden Längs- und Querbeschleunigung eingegangen werden. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird die Längsbeschleunigung mit dem Wert 1 und die Querbeschleunigung mit dem Wert 2 verrechnet.

Die Berechnung der Kosten der Zielpunktbewertung erfolgt als ungewichteter Mittelwert der Einzelkosten aus Längsabständen, Querabständen und der Wunschgeschwindigkeit. Für die Längs- und Querkosten werden alle Wechselwirkungen mit Objekten (statisch, dynamisch) und der Straße berücksichtigt.

Bei der Trajektorienbewertung wird die Bewertung der Zustände entsprechend einer zeitlichen Diskretisierung vorgenommen. Die Fuzzy-Funktionen  $x_{T1}$  bis  $x_{T4}$  werden für jeden Punkt berechnet. Dabei kommt in den fol-

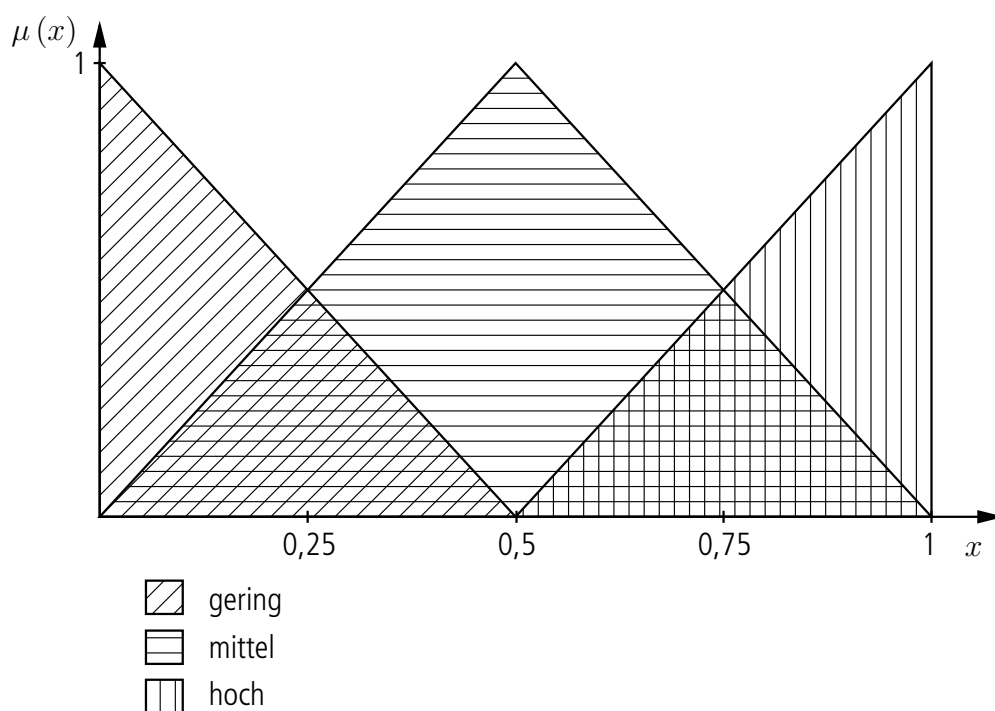


Abbildung A.1: Fuzzy-Mengen der Kostenterme.

genden Untersuchungen ein Zeitintervall von 50 ms zur Anwendung. Die Fuzzy-Funktion  $x_{T5}$  wird einmalig mit dem höchsten Wert der Beschleunigungen berechnet. Im Gegensatz dazu kommt  $x_{T6}$  einmalig am Ende der Kostenberechnung zum Einsatz. Dabei werden die höchsten sicherheitsrelevanten Kosten ermittelt und anhand dessen möglicherweise eine Hochstufung der Sicherheit vorgenommen. Die errechneten Werte werden gemittelt und ausgegeben.

### Verrechnung der Bewertungen

Um die für jeden Zielpunkt und jede Trajektorie berechneten Kosten aller Teilnehmer zusammenzubringen, ist ein Schlüssel zur Verrechnung notwendig. Als erstes werden die Kosten der Zielpunkte und die Kosten der Trajektorie für jeden Teilnehmer einzeln im Verhältnis 1:1 addiert. Dieses Verhältnis bevorzugt den Zielpunkt, da die Kosten des Zielpunkts lediglich aus einem Wert, die Kosten der Trajektorie aber aus einem Durchschnittswert über mehrere Punkte ermittelt werden. Diese Bevorzugung des Zielpunkts ist darin begründet, dass der Fahrer sich manuell in eine kooperativ zu lösende Situation gebracht hat und er das Fahrzeug nach erfolgreicher Durchführung des Manövers wieder übernehmen muss. Somit ist die Übersichtlichkeit im Zielpunkt wichtiger als die gefahrene Trajektorie. Die Verrechnung der Kosten der unterschiedlichen Teilnehmer kann ebenfalls durch ein bestimmtes Verhältnis angegeben werden. So ist es denkbar, dass Sondereinsatzfahrzeuge eine höhere Priorität bekommen, also auch die Kosten höher gewichtet in die Gesamtkostenbetrachtung eingehen. Für die in diesen Untersuchungen durchgeführten Simulationen wird von einem Verhältnis von 1:1 unter allen Teilnehmern ausgegangen. Die Formeln A.6, A.7 und A.8 geben die Be- und Verrechnung der Kosten an.

$$C_{\text{Plan}} = \sum_0^N C^n \quad (\text{A.6})$$

$$C^n = C_{\text{Zielpunkt}}^n + C_{\text{Trajektorie}}^n \quad (\text{A.7})$$

$$C^n = \left( \frac{C_{Z1}^n + C_{Z2}^n + C_{Z3}^n}{3} \right) + \left( \frac{\sum_0^M C_{T1}^{n,m} + C_{T2}^{n,m} + C_{T6}^{n,m} \cdot (C_{T3}^{n,m} + C_{T4}^{n,m} + C_{T5}^{n,m})}{M} \right) \quad (\text{A.8})$$

## A.9 Erzeugung konkreter Szenarien

Als Szenarien sind das Auffahren auf eine Autobahn, das Überholen auf der Landstraße und ein seitlich die Straße überquerender Fußgänger in der Stadt festgelegt worden. Die Szenarien sind in Abbildung A.2 gezeigt. Sie beinhalten neben den Abmaßen und Regeln der jeweiligen Fahrumgebung auch die beteiligten Fahrzeuge. Die Kombination der möglichen Fahrzustände in den Fahrumgebungen ergeben die konkreten Szenarien eines jeden Szenarios.

### Fahrzeugzustände

Die Variation der Fahrzeugzustände soll eine große Anzahl von unterschiedlichen konkreten Szenarien für jedes Szenario erzeugen. Dabei ist für jedes der beschriebenen Szenarien ein Regelsatz zur Beschreibung des Testraums zu definieren. Innerhalb der definierten Grenzen werden die Positionen in Abständen von 5 m in Längsrichtung variiert. In Querrichtung gibt es pro Fahrstreifen 3 Zustände (nahe linker Rand, Mitte, nahe rechter Rand). Die Geschwindigkeitswerte werden in  $10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ -Schritten variiert.

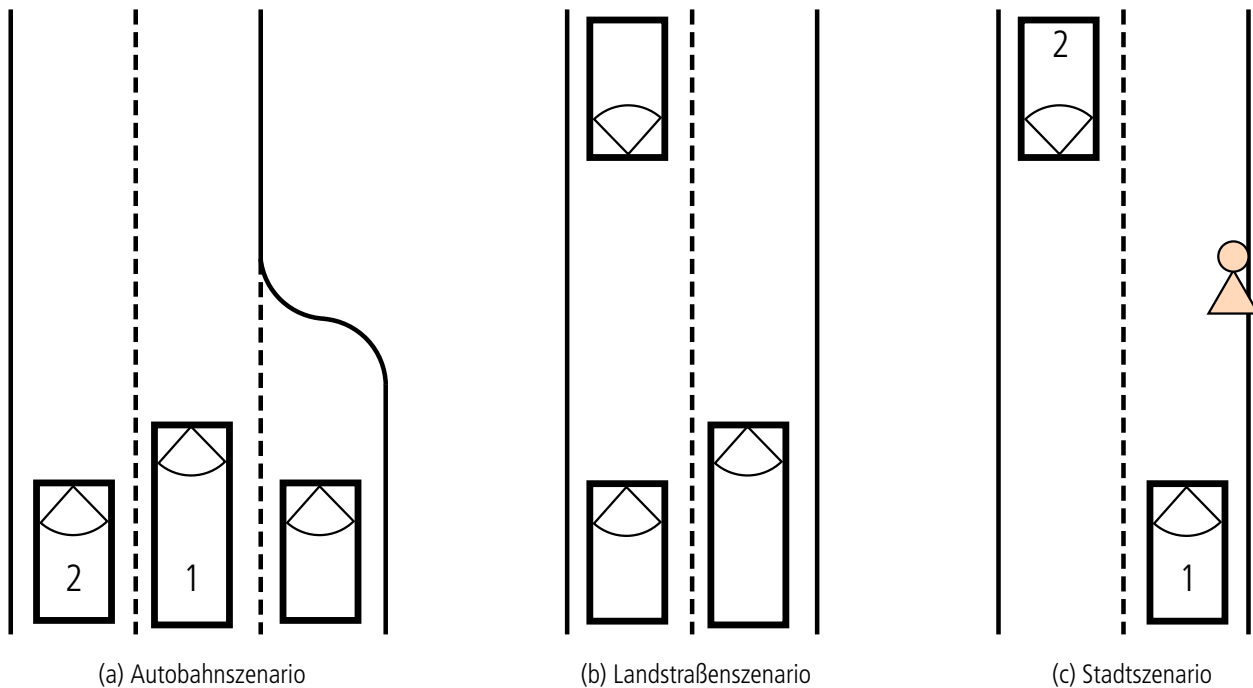


Abbildung A.2: Drei Szenarien, aus denen die konkreten Szenarien abgeleitet werden.

### Autobahnszenario

- **Fahrzeuganordnung:** Das Szenario ist in Abbildung A.2a dargestellt. Ein PKW (Einfädler) versucht, auf die Autobahn aufzufahren, während sich ein LKW (Fahrzeug 1) auf dem rechten Fahrstreifen und ein PKW (Fahrzeug 2) auf dem linken Fahrstreifen auf Höhe der Auffahrt befinden.
- **Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten:** Der Geschwindigkeitsbereich des Szenarios liegt zwischen der Mindestgeschwindigkeit von  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  und der Höchstgeschwindigkeit (=Richtgeschwindigkeit) von  $130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Für die PKW ergibt sich somit ein Geschwindigkeitsbereich von  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  bis  $130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , für LKW laut StVO ein Geschwindigkeitsbereich von  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  bis  $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Neben der Beschreibung des Geschwindigkeitsbereichs gibt es durch das Szenario festgelegte weitere Einschränkungen. So sollten die konkreten Szenarien dem Einfädler das Auffahren technisch ermöglichen. Als Maß wird hierzu die TTC genutzt, die die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und den Abstand zum potenziellen Kollisionsobjekt ins Verhältnis setzt. Empirisch wurde eine TTC mit der Begrenzung des Beschleunigungstreifens von 1 s ermittelt.

---

Nach [310] ist eine TTC von mehr als 2 s nicht sicherheitskritisch, da die drohende Kollision vom Fahrer durch ein ungefährliches Ausweich- oder Bremsmanöver aufgelöst werden kann. Weitere Eigenschaften der konkreten Szenarien sind als Wechselwirkung zwischen den Verkehrsteilnehmern aufgelistet:

- Einfädler und Fahrzeug 1: Der Abstand der beiden Fahrzeuge sollte so gewählt sein, dass sie beim Einfädeln in Konflikt geraten können. Somit wird verhindert, dass der Einfädler ungehindert auf die Autobahn auffahren kann. In einem solchen Fall würde der Fahrer keine Unterstützung durch die kooperative Manöverplanung benötigen.
- Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2: Fahrzeug 1 fährt genauso schnell wie oder langsamer als Fahrzeug 2. Fahrzeug 1 ist vor oder auf der gleichen Höhe wie Fahrzeug 2. Beide Fahrzeuge befinden sich auf Höhe des Einfädelstreifens.

## Landstraßenszenario

- Fahrzeuganordnung: In einer Studie der Unfallforschung der Versicherer [11] wurde ermittelt, dass PKW knapp 90 % der 15.173 untersuchten Überholvorgänge auf Landstraßen initiierten. LKW hingegen führten nur knapp 2 % Überholungen durch. Bei der Art des überholten Fahrzeugs zeigt sich, am häufigsten LKW überholt wurden (37 %). Weiterhin besagt die Studie, dass in 69 % der Fälle ein einziges Fahrzeug überholt wurde. Die größte Anzahl der Unfälle passiert mit 48 % in der Überholphase, also nicht beim Aus- oder Einscheren vor bzw. nach dem Überholvorgang.

Demnach ist das Szenario wie in Abbildung A.2b aufgebaut. Der Überholer (PKW) ist bereits beim direkten Überholvorgang und überholt ein anderes Fahrzeug (LKW). In der Phase des direkten Überholvorgangs befindet sich ein entgegenkommendes Fahrzeug (ein PKW) auf Kollisionskurs.

- Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten: Die Höchstgeschwindigkeit in diesem Szenario beträgt mit  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  diejenige, die durch das Szenario festgeschrieben ist. Da von einem frei befahrbaren Straßenabschnitt ausgegangen wird, werden kleine Geschwindigkeiten nicht betrachtet. Es ist jedoch möglich, dass die Fahrzeuge kurz hinter einer Ortsausfahrt die Landstraße befahren, was zu einer unteren Grenze von  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  führt.

Für PKW ergibt sich somit ein Geschwindigkeitsbereich von  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  bis  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , für LKW laut StVO ein Geschwindigkeitsbereich von  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  bis  $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Neben der Beschreibung des Geschwindigkeitsbereichs gibt es durch das Szenario festgelegte, weitere Einschränkungen. Diese werden anschließend als Wechselwirkung zwischen den Verkehrsteilnehmern aufgelistet:

- Überholer und Überholter: Ein Überholvorgang wie dargestellt kann nur mit einer gewissen Differenzgeschwindigkeit stattfinden. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird von einer Mindest-differenzgeschwindigkeit von  $10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  ausgegangen. Des Weiteren darf die Entfernung der beiden Fahrzeuge nicht größer sein, als dass sie im Zeitraum überwunden werden kann. Dadurch wird eine Konstellation eines weit nacheilenden oder weit vorfahrenden Überholers/Überholten vermieden.
- Überholer und Gegenverkehr: Als Maß für die Bildung von Konstellationen des Überholers und des Gegenverkehrs eignet sich die Bestimmung der TTC, da sie den Abstand der Objekte und deren Geschwindigkeiten ins Verhältnis setzt. Als obere Grenze der TTC wird die sicherheitsunkritische Marke von 2 s angenommen. Weiterhin wurde empirisch ermittelt, dass auch bei kleiner Überdeckung und freier Strecke eine TTC von kleiner als 500 ms nicht aufzulösen ist.

## Stadtszenario

- Fahrzeuganordnung: Im Jahr 2014 ist es in der Stadt zu 28.323 Unfällen zwischen Fußgängern auf der einen Seite und LKW bzw. PKW auf der anderen Seite gekommen. Dabei entfallen 72 % auf Fußgängerunfälle mit PKW-Beteiligung und etwas über 4 % auf Fußgängerunfälle mit LKW-Beteiligung [271]. Aus diesem Grund werden für dieses Szenario nur PKW verwendet. In der Untersuchung der Unfälle wurde das Heraustreten auf die Fahrbahn aus der Verdeckung und das Nichtbeachten des fließenden Verkehrs

als größte Unfallgefahren identifiziert. Um in diesem Szenario die Möglichkeiten der kooperativen Manöverplanung zu untersuchen, fährt ein PKW (Fahrzeug 1) in Süd-Nord-Richtung, während ein anderer PKW (Fahrzeug 2) in Nord-Süd-Richtung fährt. Zu einem bestimmten Zeitpunkt erscheint ein durch ein statisches Objekt abgebildeter Fußgänger auf dem Fahrstreifen von Fahrzeug 1. Das statische Objekt wird als Quadrat mit der Kantenlänge von 50 cm abgebildet und taucht immer an derselben Stelle auf.

Die Situation ist in Abbildung A.2c gezeigt. Zwei PKW fahren auf einer einbahnigen, zweistreifigen innerstädtischen Straße. An einer definierten Stelle erscheint ein statisches Objekt, welches den Fußgänger repräsentiert.

- Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten: Die Fahrumgebung lässt in diesem Szenario eine maximale Geschwindigkeit von  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  zu. Die Überlebenswahrscheinlichkeit bei einem PKW-Fußgänger-Unfall wird bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  mit 20 % [16] angegeben. Die untere Grenze wird auf  $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  festgeschrieben, da die Überlebenswahrscheinlichkeit für Fußgänger bei Berücksichtigung dieser Geschwindigkeitsgrenze bei Unfällen auf zwischen 70 % [16] und ca. 95 % [229] ansteigt. Geschwindigkeiten unter dieser Grenze können durch geeignete passive Maßnahmen adressiert werden und stehen daher nicht im Fokus dieser Analyse.
  - Fahrzeug 1 und statisches Objekt: Auch in diesem Szenario werden die Schwellen der TTC von Fahrzeug 1 mit dem statischen Objekt ermittelt und als Maß für die Fahrzeugposition herangezogen. Es wurde empirisch ermittelt, dass unter einer TTC von 500 ms es keine Lösungsmöglichkeiten mehr gab. Über einer TTC von 2 s liegt keine sicherheitskritische Situation mehr vor. Damit ergibt sich ein Bereich der TTC zwischen Fahrzeug 1 und dem statischen Objekt von 0,5 s – 2 s.
  - Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2: Der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen soll gewählt sein, dass sie eine überwindbare Entfernung darstellt. Weiterhin soll es möglich sein, dass sich die Fahrzeuge an der Stelle des statischen Objekts begegnen.

## A.10 Kooperative Manöverplanung im Realfahrzeug



(a) Konfliktsituation zweier Fahrzeuge und eines Fußgängers



(b) Moment der Planübermittlung und Beginn der Plandurchführung



(c) Moment des koordinierten Manövers, in dem das eine Fahrzeug bremst und das andere ausweicht



(d) Moment der Rückführung des Lenkrads zur Steuerung in den linken Fahrstreifen



(e) Moment der Übergabe an den Fahrer



(f) Fahrerübernahme im sicheren Endzustand erfolgt

Abbildung A.3: Kooperative Manöverplanung im Realfahrzeug.





# Abbildungsverzeichnis

1.1	Konfliktsituationen, deren effiziente und unfallfreie Auflösung vom Verhalten mehrerer Fahrzeuge abhängt. . . . .	2
1.2	Drei Forschungsfragen als strukturierendes Element der Arbeit. . . . .	6
2.1	Systemebenenmodell der PATH-Architektur [123]. . . . .	16
2.2	Architektur der Demo 2000 [288]. . . . .	17
2.3	Architektur des Auto21-Projekts [111]. . . . .	18
2.4	Systemarchitektur des SFB/TR 28 [84]. . . . .	19
2.5	Architektur von Caveney [32]. . . . .	20
2.6	Prozentuale Aufteilung der 213 relevanten Literaturquellen in die sechs definierten Bereiche. . . . .	30
3.1	Einfluss der Verhaltensweisen von Agent $A_1$ auf die Nutzen $n_1$ und $n_2$ . . . . .	40
3.2	Durch den Gesamtnutzen $N_G(n_1, n_2)$ illustriertes kooperatives Verhalten in Anlehnung an [59]. . . . .	41
3.3	Darstellung des kooperativen Bonussystems in Anlehnung an [230]. . . . .	43
4.1	Deliberatives Kontrollparadigma für ein Fahrzeug. . . . .	48
4.2	Deliberatives Kontrollparadigma für ein vernetztes Fahrzeug in Anlehnung an [80]. . . . .	48
4.3	Architekturvorschlag der kooperativen Abstimmung in Anlehnung an [80]. . . . .	50
5.1	Ablauf der kooperativen Manöverplanung [58]. . . . .	59
5.2	Definition des Koordinatensystems der kooperativen Manöverplanung. . . . .	60
5.3	Konzept zur Ermittlung der Zielpunkte. . . . .	61
5.4	Modelltrajektorien unterschiedlicher Manöver in Anlehnung an [60]. . . . .	61
5.5	Form einer Erreichbarkeitsmenge (gepunktet) und Modelltrajektorien mit einmalig lenkender Bewegung (durchgezogen) von einem Startpunkt (links) zu vielen Endzuständen (rechts). . . . .	62
5.6	Beziehung zwischen den Variablen zur Berechnung von Modelltrajektorien mit einer lenkenden Bewegung in Anlehnung an [60]. . . . .	63
5.7	Unterschiedliche Fälle für die Berechnung des Gegenlenkzeitpunkts. . . . .	66
5.8	Sprung in $\alpha_{\text{Quer}}$ im Moment des Gegenlenkens ( $t_{\text{GL}}$ ) sowie zu Beginn und zu Ende des Manövers. . . . .	66
5.9	Form einer Erreichbarkeitsmenge (gepunktet) und Modelltrajektorien mit lenkender Bewegung, die parallel zum Anfangszustand enden (durchgezogen) von einem Startpunkt (links) zu vielen Endzuständen (rechts). . . . .	67
5.10	Variation des Geschwindigkeitsprofils auf einem Pfad. . . . .	68
5.11	Funktionsweise des SAT [58]. . . . .	69
5.12	Gitter bestehend aus anfahrbaren und mit statischen Objekten kollisionsfreien Stützpunkten. . . . .	70
5.13	Pfaderzeugungsprozess in Anlehnung an [60]. . . . .	73
5.14	Längs- und Querschleunigung auf einem Pfad. . . . .	74
5.15	Fuzzifizierung der Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit. . . . .	82
6.1	Darstellung einer Situation in den Simulationsumgebungen. . . . .	92
6.2	Versuchsstand zum Erleben des Kooperativen Fahrens [58]. . . . .	93
6.3	Unfallvermeidung beim Auffahren auf die Autobahn mit drei Fahrzeugen (A3S). . . . .	97
6.4	Unfallvermeidung beim riskanten Überholversuch auf einer Landstraße mit drei Fahrzeugen (Ü3). . . . .	98
6.5	Unfallvermeidung beim Auftauchen eines Hindernisses in der Stadt mit zwei Fahrzeugen (F2). . . . .	98
6.6	Komfortables Auffahren auf die Autobahn in Anwesenheit zweier LKW (A3K). . . . .	99

6.7	Platoon-Fahrstreifenwechsel mit drei LKW auf einer Landstraße (P3). . . . .	100
6.8	Einfluss der Fahrzeugfähigkeiten auf den Plan (A3K). . . . .	100
6.9	Einfluss der Fahrerpräferenzen auf den Plan (A3K). . . . .	101
6.10	Befolgen der sicheren Trajektorien und Erreichen der sicheren Endzustände im SiL-Verfahren (T2). . . . .	105
6.11	Befolgen der sicheren Trajektorien und Erreichen der sicheren Endzustände im HiL-Verfahren (T2). . . . .	106
6.12	Gefahrensituation zur Verdeutlichung des Umgangs mit nicht beeinflussbaren Teilnehmern (Ü3). In den gezeigten Fällen ist das gelbe Fahrzeug nicht beeinflussbar. . . . .	108
6.13	Planung der Konfliktsituation mit der Methode der gerichteten Graphen. . . . .	109
6.14	Planung der Konfliktsituation mit der Methode der elastischen Bänder. . . . .	110
6.15	Planung der Konfliktsituation mit der kooperativen Manöverplanung. . . . .	110
6.16	Ergebnisse der Planungsmethoden bei großem Abstand zwischen Überholer und Überholtem. . . . .	111
6.17	Ergebnisse der Planungsmethoden bei mittlerem Abstand zwischen Überholer und Überholtem ( $T = 2,6$ s). . . . .	111
6.18	Ergebnisse der Planungsmethoden bei mittlerem Abstand zwischen Überholer und Überholtem ( $T = 3,2$ s). . . . .	112
6.19	Die Architektur der kooperativen Abstimmung in Anlehnung an [80]. . . . .	115
6.20	Zentrale Variante der kooperativen Abstimmung. . . . .	115
6.21	Peer-Variante der kooperativen Abstimmung. . . . .	117
6.22	Dezentrale Variante der kooperativen Abstimmung. . . . .	117
6.23	Minimierung der Gesamtkosten als Teil der Definition kooperativen Verhaltens (A2K). . . . .	119
6.24	Konsequente Lösung von Konfliktsituationen ohne Reziprozität (3x A2K). . . . .	120
6.25	Berücksichtigung vorheriger kooperativer Handlungen (3x A2K). . . . .	121
7.1	Das fahrzeugübergreifende kooperative Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem zur Vermeidung eines Unfalls mit einem aus der Verdeckung tretenden Fußgänger im Einsatz in Realfahrzeugen. . . . .	127
A.1	Fuzzy-Mengen der Kostenterme. . . . .	144
A.2	Drei Szenarien, aus denen die konkreten Szenarien abgeleitet werden. . . . .	146
A.3	Kooperative Manöverplanung im Realfahrzeug. . . . .	149

# Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung und Beschreibung des Suchstrings. . . . .	9
2.2	Zusammenfassung der Eigenschaften der Definitionen kooperativen Verhaltens. . . . .	14
2.3	Gegenüberstellung von Anforderungen und bekannten Definitionen kooperativen Verhaltens. . .	15
2.4	Zusammenfassung der Eigenschaften der Architekturvorschläge. . . . .	22
2.5	Gegenüberstellung von Anforderungen und bekannten Architekturvorschlägen. . . . .	23
2.6	Neun Methoden zur Planung kooperativer Manöver. . . . .	27
2.7	Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen. . . . .	29
2.8	Gegenüberstellung von Anforderungen und Fahrmanöverkoordinationsmethoden. . . . .	33
3.1	Eigenschaften der neuen Definition kooperativen Verhaltens. . . . .	45
3.2	Gegenüberstellung von Anforderungen der Definitionen kooperativen Verhaltens. . . . .	45
4.1	Nachrichten für die kooperative Abstimmung. . . . .	52
4.2	Eigenschaften der kooperativen Abstimmung. . . . .	53
4.3	Gegenüberstellung von Anforderungen und Architekturvorschlägen. . . . .	54
5.1	Berechnung des Gegenlenkzeitpunkts $t_{GL}$ für unterschiedliche Fälle. . . . .	67
5.2	Mögliche Bewertungskriterien der kooperativen Manöverplanung. . . . .	76
5.3	Eigenschaften der kooperativen Manöverplanung. . . . .	87
5.4	Gegenüberstellung von Anforderungen und Manöverplanungsmethoden. . . . .	89
6.1	Werte der Fahrumgebungen [72–74]. . . . .	94
6.2	Werte der Fahrzeugklassen [51, 256]. . . . .	95
6.3	Tests der kooperativen Manöverplanung. . . . .	96
6.4	Untersuchungsbereiche zur Erstellung von Parametersätzen. . . . .	102
6.5	Mögliche Parametrierungen der kooperativen Manöverplanung. . . . .	103
6.6	Fünf Parametersätze für die kooperative Manöverplanung. . . . .	103
6.7	Ergebnisse der Parametersatzuntersuchung. . . . .	104
A.1	Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen für den Bereich Luft- und Raumfahrt. . . . .	130
A.2	Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich der Nautik. . . . .	131
A.3	Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich der Robotik. . . . .	132
A.4	Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich der landgebundenen Fahrzeuge. . . . .	133
A.5	Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich des Verkehrsmanagements. . . . .	134
A.6	Gegenüberstellung der Planungsmethoden und Anwendungen im Bereich der straßengebundenen Fahrzeuge. . . . .	135
A.7	Verwendete Parametrierung des Kostenfunktional. . . . .	144



# Literaturverzeichnis

- [1] H.-B. Abel, H.-J. Blume, L. Brabetz, M. Broy, S. Fürst, L. Ganzelmeier, J. Helbig, G. Heyen, M. Jipp, G. Kasties, P. Knoll, O. Krieger, R. Lachmayer, K. Lemmer, W. Pfaff, T. Scharnhorst und S. Guido. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Kapitel 8. Elektrik/Elektronik/Software, Seiten 926–1104. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [2] A. Aghaeeyan, F. Abdollahi und H. Talebi. Robust cooperative control in the presence of obstacles. In *21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Seiten 1–6, Mai 2013. DOI: 10.1109/IranianCEE.2013.6599904.
- [3] M. Aicardi. Coordination and control of a team of mobile robots. In *INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Ausgabe 2, Seiten 335–344, Oktober 1995. DOI: 10.1109/ETFA.1995.496674.
- [4] Aktiv-Partner. Aktiv - gemeinsam die Zukunft erfahren - Ergebnisse. Technischer Bericht, Aktiv-Partner, 2011.
- [5] B. M. Albaker und N. Rahim. Straight projection conflict detection and cooperative avoidance for autonomous unmanned aircraft systems. In *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Seiten 1965–1969, Mai 2009. DOI: 10.1109/ICIEA.2009.5138546.
- [6] M. Alighanbari, Y. Kuwata und J. How. Coordination and control of multiple UAVs with timing constraints and loitering. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 6, Seiten 5311–5316, Juni 2003. DOI: 10.1109/ACC.2003.1242572.
- [7] M. Althoff, D. Althoff, D. Wollherr und M. Buss. Safety verification of autonomous vehicles for coordinated evasive maneuvers. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 1078–1083, Juni 2010. DOI: 10.1109/IVS.2010.5548121.
- [8] R. Arkin. *Behavior-based Robotics*. Bradford book. MIT Press, 1998. ISBN 9780262011655.
- [9] R. M. Axelrod. *The evolution of cooperation*. Basic books, 2006.
- [10] J. Baber, J. Kolodko, T. Noel, M. Parent und L. Vlacic. Cooperative autonomous driving: intelligent vehicles sharing city roads. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 12(1):44–49, März 2005. ISSN 1070-9932. DOI: 10.1109/MRA.2005.1411418.
- [11] J. Bakaba und J. Ortlepp. Unfallforschung Kompakt - Prävention von überholunfällen auf Landstraßen. Technischer Bericht, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Unfallforschung der Versicherer, 2014.
- [12] J. Bakaba, M. Enke, A. Heine, C. Lippold, R. Maier, J. Ortlepp und R. Schulz. Untersuchung der Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen auf Bundesautobahnen. Technischer Bericht, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Unfallforschung der Versicherer, 2012.
- [13] R. Balaghiasefi. *Überwachung kooperativer Manöverplanung*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2018.

- [14] R. Balaghiasefi, M. Düring, K. Franke und A. Zimmermann. Automatic fault detection and execution monitoring in cooperative maneuvering. In *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Seiten 37–44, Dezember 2015. DOI: 10.1109/ITST.2015.7377397.
- [15] E. Barth. A Cooperative Control Structure for UAV s Executing a Cooperative Ground Moving Target Engagement (CGMTE) Scenario. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 2183–2190, Juni 2006. DOI: 10.1109/ACC.2006.1656543.
- [16] J. Barz. Die tödliche Wirkung des Aufpralls bei einem Verkehrsunfall zwischen Pkw und erwachsenen Fußgängern. Technischer Bericht, Uni Düsseldorf / Landesverkehrswacht Nordrhein-Westfalen, 1990.
- [17] Y. Ben-Asher, S. Feldman, P. Gurfil und M. Feldman. Distributed Decision and Control for Cooperative UAVs Using Ad Hoc Communication. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(3):511–516, Mai 2008. ISSN 1063-6536. DOI: 10.1109/TCST.2007.906314.
- [18] A. Benmimoun, D. Neunzig und C. Maag. *Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Straßenverkehr*. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), 2004.
- [19] Y. Bi, H. Zhao und X. Shen. A Directional Broadcast Protocol for Emergency Message Exchange in Inter-Vehicle Communications. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Seiten 1–5, Juni 2009. DOI: 10.1109/ICC.2009.5198592.
- [20] A. Bicchi und L. Pallottino. On optimal cooperative conflict resolution for air traffic management systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1(4):221–231, Dezember 2000. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/6979.898228.
- [21] A. Binner. Visualisierung und Auswertung von Testfahrten. *HANSER automotive*, (05/06):16–18, 2014.
- [22] A. Birk, G. Antonelli, A. Caiti, G. Casalino, G. Indiveri, A. Pascoal und A. Caffaz. The CO3AUVs (Cooperative Cognitive Control for Autonomous Underwater Vehicles) project: Overview and current progresses. In *IEEE OCEANS*, Seiten 1–10, Juni 2011. DOI: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003552.
- [23] E. Boivin, A. Desbiens und E. Gagnon. UAV collision avoidance using cooperative predictive control. In *16th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Seiten 682–688, Juni 2008. DOI: 10.1109/MED.2008.4602109.
- [24] M. Bouroche, B. Hughes und V. Cahill. Real-time coordination of autonomous vehicles. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Seiten 1232–1239, September 2006. DOI: 10.1109/ITSC.2006.1707391.
- [25] H.-H. Braess. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [26] L. Brinon-Arranz, A. Seuret und C. Canudas-de Wit. Cooperative Control Design for Time-Varying Formations of Multi-Agent Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(8):2283–2288, August 2014. ISSN 0018-9286. DOI: 10.1109/TAC.2014.2303213.
- [27] R. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(1):14–23, März 1986. ISSN 0882-4967. DOI: 10.1109/JRA.1986.1087032.
- [28] K.-D. Brösdorf, H. Burg, A. Moser und M. Martinsohn. *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion - Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*, Kapitel Pkw-Pkw-Unfälle, Seiten 411–437. Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [29] F. Bu, H.-S. Tan und J. Huang. Design and field testing of a Cooperative Adaptive Cruise Control system. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 4616–4621, Juni 2010. DOI: 10.1109/ACC.2010.5531155.

- 
- [30] H. Burg. *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [31] C. Cassandras und W. Li. A receding horizon approach for solving some cooperative control problems. In *41st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 4, Seiten 3760–3765, Dezember 2002. DOI: 10.1109/CDC.2002.1184949.
- [32] D. Caveney. Hierarchical Software Architectures and Vehicular Path Prediction for Cooperative Driving Applications. In *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 1201–1206, Oktober 2008. DOI: 10.1109/ITSC.2008.4732536.
- [33] P. R. Chandler, M. Pachter und S. Rasmussen. UAV cooperative control. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 1, Seiten 50–55, 2001. DOI: 10.1109/ACC.2001.945512.
- [34] P. R. Chandler, M. Pachter, D. Swaroop, J. Fowler, J. Howlett, S. Rasmussen, C. Schumacher und K. Nygard. Complexity in UAV cooperative control. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 3, Seiten 1831–1836, 2002. DOI: 10.1109/ACC.2002.1023833.
- [35] W. Chang, J. Wu und C. Tan. Encounter-based noise cancelation for cooperative trajectory mapping. In *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, Seiten 221–226, März 2012. DOI: 10.1109/PerCom.2012.6199870.
- [36] Y. H. Chang, C. Tomlin und K. Hedrick. Biologically-inspired coordination of multiple UAVs using sliding mode control. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 4123–4128, Juni 2011. DOI: 10.1109/ACC.2011.5991252.
- [37] H. Chen, P. Hovareshti und J. Baras. Distributed Collaborative Controlled autonomous vehicle systems over wireless networks. In *18th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Seiten 1695–1700, Juni 2010. DOI: 10.1109/MED.2010.5547803.
- [38] T. Cheng und A. Savkin. Decentralized coordinated control of a vehicle network for deployment in sweep coverage. In *IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Seiten 275–279, Dezember 2009. DOI: 10.1109/ICCA.2009.5410535.
- [39] Y.-L. Chuang, Y. Huang, M. D’Orsogna und A. Bertozzi. Multi-Vehicle Flocking: Scalability of Cooperative Control Algorithms using Pairwise Potentials. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 2292–2299, April 2007. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363661.
- [40] K. Cook, E. Bryan, H. Yu, H. Bai, K. Seppi und R. Beard. Intelligent cooperative control for urban tracking with Unmanned Air Vehicles. In *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Seiten 1–7, Mai 2013. DOI: 10.1109/ICUAS.2013.6564667.
- [41] V. Crespi, G. Cybenko, D. Rus und M. Santini. Decentralized control for coordinated flow of multi-agent systems. In *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Ausgabe 3, Seiten 2604–2609, 2002. DOI: 10.1109/IJCNN.2002.1007554.
- [42] D. de Bruin, J. Kroon, R. van Klaveren und M. Nelisse. Design and test of a cooperative adaptive cruise control system. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 392–396, Juni 2004. DOI: 10.1109/IVS.2004.1336415.
- [43] G. R. de Campos, P. Falcone und J. Sjöberg. Autonomous cooperative driving: A velocity-based negotiation approach for intersection crossing. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 1456–1461, Oktober 2013. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728435.
- [44] M. Defoort, T. Floquet, A. Kokosy und W. Perruquetti. Sliding-Mode Formation Control for Cooperative Autonomous Mobile Robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(11):3944–3953, November 2008. ISSN 0278-0046. DOI: 10.1109/TIE.2008.2002717.

- [45] Y. Deng, P.-P. Beaujean, E. An und E. Carlson. A Path planning control strategy for search-classify task using multiple cooperative underwater vehicles. In *OCEANS*, Seiten 1–9, September 2008. DOI: 10.1109/OCEANS.2008.5152054.
- [46] C. Desjardins und B. Chaib-draa. Cooperative Adaptive Cruise Control: A Reinforcement Learning Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4):1248–1260, Dezember 2011. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2011.2157145.
- [47] M. Deutsch. *Conflict, Interdependence, and Justice*, Kapitel Cooperation and Competition, Seiten 23–40. Peace Psychology Book Series, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-9994-8\_2.
- [48] Deutscher Verkehrssicherheitsrat. Verkehrssicherheit 2020 - Eckpunktepapier. Technischer Bericht, Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2010.
- [49] Deutscher Verkehrssicherheitsrat. Vision Zero. Grundlagen & Strategien. Technischer Bericht, Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2012.
- [50] V. Digani, L. Sabattini, C. Secchi und C. Fantuzzi. Towards decentralized coordination of multi robot systems in industrial environments: A hierarchical traffic control strategy. In *IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Seiten 209–215, September 2013. DOI: 10.1109/ICCP.2013.6646110.
- [51] E. Donath. *Beschleunigungs- und Verzögerungswerte von Straßenfahrzeugen - GWZ-Tabelle*. Verlag TÜV SÜD, 2008.
- [52] W. Dong und J. Farrell. Decentralized cooperative control of multiple nonholonomic systems. In *46th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Seiten 1486–1491, Dezember 2007. DOI: 10.1109/CDC.2007.4434028.
- [53] W. Dong und J. Farrell. Consensus of multiple uncertain mechanical systems and its application in cooperative control of mobile robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 1954–1959, Mai 2008. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543493.
- [54] dSPACE. MicroAutoBox. Letzter Zugriff am 13.07.2015 unter <https://www.dspace.com/de/gmb/home/products/hw/micautob.cfm>.
- [55] W. Dunbar und R. Murray. Model predictive control of coordinated multi-vehicle formations. In *41st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 4, Seiten 4631–4636, Dezember 2002. DOI: 10.1109/CDC.2002.1185108.
- [56] G. Dupuis und W. Kerkhoff. *Enzyklopädie der Sonderpädagogik*. Wissenschaftsverlag Volker Spiess, 1992.
- [57] M. Düring. Kooperative Manöverplanung als wichtiger Baustein des Kooperativen Fahrens. In *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*, Seiten 86–106, Februar 2015.
- [58] M. Düring und K. Lemmer. Cooperative Maneuver Planning for Cooperative Driving. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 8(3):8–22, Fall 2016. ISSN 1939-1390. DOI: 10.1109/MITS.2016.2549997.
- [59] M. Düring und P. Pascheka. Cooperative Decentralized Decision Making for Conflict Resolution among Autonomous Agents. In *IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Seiten 154–161, Juni 2014. DOI: 10.1109/INISTA.2014.6873612.



- 
- [60] M. Düring, K. Franke, R. Balaghiasefi, M. Gonter, M. Belkner und K. Lemmer. Adaptive cooperative maneuver planning algorithm for conflict resolution in diverse traffic situations. In *IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Seiten 242–249, November 2014. DOI: 10.1109/ICCVE.2014.7297550.
- [61] M. Düring, M. Gonter, F. Thiel und F. Weinert. Models enabling Simulations of V2X Applications regarding Emergency Vehicles in Urban Environment. In *SUMO - Modeling Mobility with Open Data*, ISSN 1866-721X, Seiten 55–75, Mai 2014.
- [62] M. Earl und R. D’Andrea. A study in cooperative control: the RoboFlag drill. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 3, Seiten 1811–1812, 2002. DOI: 10.1109/ACC.2002.1023829.
- [63] Elektrobit Automotive. EB Assist ADTF. Letzter Zugriff am 13.07.2015 unter <https://www.elektrobit.com/products/eb-assist/adtf/>.
- [64] D. Ellinghaus. *Rücksichtslosigkeit und Partnerschaft*. Uniroyal, 1986.
- [65] M. Endo, K. Hirose, Y. Hirata, K. Kosuge, Y. Sugahara, K. Suzuki, K. Murakami, K. Nakamura, M. Nakanishi und T. Kanbayashi. A coordinated control algorithm based on the caster-like motion for a car transportation system -iCART-. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 2350–2355, Mai 2009. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152785.
- [66] C. Ericson. *Real-time collision detection*. Elsevier, 2010.
- [67] C. Etter. *Nachgründungsdynamik neugegründeter Unternehmen in Berlin im interregionalen Vergleich*. Dissertation, Freie Universität Berlin, 2003.
- [68] A. Eugensson. Volvo Vision 2020. Technischer Bericht, Volvo Car Corporation, 2010.
- [69] J. Feddema, C. Lewis und D. Schoenwald. Decentralized control of cooperative robotic vehicles: theory and application. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(5):852–864, Oktober 2002. ISSN 1042-296X. DOI: 10.1109/TRA.2002.803466.
- [70] N. Findler und G. Elder. Multiagent coordination and cooperation in a distributed dynamic environment with limited resources. *Artificial Intelligence in Engineering*, Seiten 229–238, 1995. DOI: 10.1016/0954-1810(95)00011-7.
- [71] M. Flint, E. Fernandez-Gaucherand und M. Polycarpou. Cooperative control for UAV’s searching risky environments for targets. In *42nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 4, Seiten 3567–3572, Dezember 2003. DOI: 10.1109/CDC.2003.1271701.
- [72] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2007.
- [73] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2008.
- [74] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Richtlinien für die Anlage von Landstraßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2013.
- [75] P. Fraitse, D. Andreu, R. Zapata, J. P. Richard und T. Divoux. Remote decentralized control strategy for cooperative mobile robots. In *8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference (ICARCV)*, Ausgabe 2, Seiten 1011–1016, Dezember 2004. DOI: 10.1109/ICARCV.2004.1468982.

- [76] E. Franco, T. Parisini und M. Polycarpou. Cooperative control of discrete-time agents with delayed information exchange: A receding-horizon approach. In *43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 4, Seiten 4274–4279, Dezember 2004. DOI: 10.1109/CDC.2004.1429423.
- [77] E. Franco, T. Parisini und M. Polycarpou. Stable receding-horizon cooperative control of a class of distributed agents. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 7, Seiten 4673–4678, Juni 2005. DOI: 10.1109/ACC.2005.1470733.
- [78] E. Franco, T. Parisini und M. Polycarpou. Cooperative Control of Distributed Agents with Nonlinear Dynamics and Delayed Information Exchange: a Stabilizing Receding-Horizon Approach. In *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, Seiten 2206–2211, Dezember 2005. DOI: 10.1109/CDC.2005.1582489.
- [79] K. Franke, H. Schultz, M. Gonter und F. Küçükay. Car2Car Sicherheitsfunktionen der nächsten Generation. In *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*, Seiten 16–29, 2013.
- [80] K. Franke, M. Düring, R. Balaghiasefi, M. Gonter, K. Lemmer und F. Küçükay. A reference architecture for CISS/CDAS within the field of cooperative driving. In *IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Seiten 357–363, Nov 2014. DOI: 10.1109/ICCVE.2014.7297571.
- [81] K. Franke, R. Balaghiasefi, M. Düring und H.-J. Günther. A Cooperative Driver Assistance System: Decentralization Process and Test Framework. In *7. Tagung Fahrerassistenzsysteme*, 2015.
- [82] E. Frazzoli. Maneuver-based motion planning and coordination for multiple UAVs. In *21st Digital Avionics Systems Conference*, Ausgabe 2, Seiten 8D3–1 – 8D3–12, 2002. DOI: 10.1109/DASC.2002.1052947.
- [83] K. Fregene, R. Madhavan und D. Kennedy. Coordinated control of multiple terrain mapping UGVs. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Ausgabe 4, Seiten 4210–4215, April 2004. DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1308936.
- [84] C. Frese. *Planung kooperativer Fahrmanöver für kognitive Automobile*. Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie, 2011.
- [85] C. Frese und J. Beyerer. A comparison of motion planning algorithms for cooperative collision avoidance of multiple cognitive automobiles. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 1156–1162, Juni 2011. DOI: 10.1109/IVS.2011.5940489.
- [86] M. Fujii, W. Inamura, H. Murakami, K. Tanaka und K. Kosuge. Cooperative control of multiple mobile robots transporting a single object with loose handling. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Seiten 816–822, Dezember 2007. DOI: 10.1109/ROBIO.2007.4522268.
- [87] J. Funke, P. Theodosis, R. Hindiyeh, G. Stanek, K. Kritatakirana, C. Gerdes, D. Langer, M. Hernandez, B. Muller-Bessler und B. Huhnke. Up to the limits: Autonomous Audi TTS. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 541–547, Juni 2012. DOI: 10.1109/IVS.2012.6232212.
- [88] T. Furukawa. Time-optimal cooperative control of multiple robot vehicles. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Ausgabe 1, Seiten 944–950, September 2003. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241714.
- [89] T. Furukawa, H. Durrant-Whyte, F. Bourgault und G. Dissanayake. Time-optimal coordinated control of the relative formation of multiple vehicles. In *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA)*, Ausgabe 1, Seiten 259–264, Juli 2003. DOI: 10.1109/CIRA.2003.1222099.

- 
- [90] T. Furukawa, F. Bourgault, H. Durrant-Whyte und G. Dissanayake. Dynamic allocation and control of coordinated UAVs to engage multiple targets in a time-optimal manner. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Ausgabe 3, Seiten 2353–2358, April 2004. DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1307413.
- [91] S. Ganapathy und K. Passino. Agreement strategies for cooperative control of uninhabited autonomous vehicles. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 2, Seiten 1026–1031, Juni 2003. DOI: 10.1109/ACC.2003.1239721.
- [92] D. Gao, J. Lv und B. Wang. Coordinated attitude control of spacecraft formation. In *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Seiten 1173–1178, Juni 2011. DOI: 10.1109/ICIEA.2011.5975764.
- [93] A. Garapin, L. Muller und B. Rahali. Does trust mean giving and not risking? Experimental evidence from the trust game. Technischer Bericht, Université Grenoble Alpes, 2013.
- [94] N. Gaubert, M. Beauregard, F. Michaud und J. de Lafontaine. Emulation of collaborative driving systems using mobile robots. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Ausgabe 1, Seiten 856–861, Oktober 2003. DOI: 10.1109/ICSMC.2003.1243922.
- [95] A. Geramifard, J. Redding, N. Roy und J. How. UAV cooperative control with stochastic risk models. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 3393–3398, Juni 2011. DOI: 10.1109/ACC.2011.5991309.
- [96] R. Ghabcheloo, A. Pascoal und C. Silvestre. Nonlinear coordinated path following control of multiple wheeled robots with communication constraints. In *12th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Seiten 657–664, Juli 2005. DOI: 10.1109/ICAR.2005.1507479.
- [97] R. Ghabcheloo, A. Pascoal, C. Silvestre und I. Kaminer. Coordinated Path Following Control of Multiple Wheeled Robots with Directed Communication Links. In *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, Seiten 7084–7089, Dezember 2005. DOI: 10.1109/CDC.2005.1583303.
- [98] R. Ghabcheloo, I. Kaminer, A. Aguiar und A. Pascoal. A general framework for multiple vehicle time-coordinated path following control. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 3071–3076, Juni 2009. DOI: 10.1109/ACC.2009.5160564.
- [99] J. Ghommam und F. Mnif. Coordinated Path-Following Control for a Group of Underactuated Surface Vessels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10):3951–3963, Oktober 2009. ISSN 0278-0046. DOI: 10.1109/TIE.2009.2028362.
- [100] J. Ghommam und G. Poisson. Motion coordination control of multiple marine crafts. In *10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, Seiten 44–49, März 2008. DOI: 10.1109/AMC.2008.4516039.
- [101] A. Girard, J. de Sousa, J. Misener und J. Hedrick. A control architecture for integrated cooperative cruise control and collision warning systems. In *40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 2, Seiten 1491–1496, 2001. DOI: 10.1109/.2001.981105.
- [102] D. Godbole. Control and coordination in uninhabited combat air vehicles. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 2, Seiten 1487–1490, Juni 1999. DOI: 10.1109/ACC.1999.783617.
- [103] Y. Gu, S. Lin und N. Maxemchuk. A fail safe broadcast protocol for collaborative intelligent vehicles. In *16th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoW-MoM)*, Seiten 1–6, Juni 2015. DOI: 10.1109/WoWMoM.2015.7158215.

- [104] H.-J. Günther, O. Trauer und L. Wolf. The potential of collective perception in vehicular ad-hoc networks. In *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Seiten 1–5, Dezember 2015. DOI: 10.1109/ITST.2015.7377190.
- [105] Y. Guo. Decentralized Coordination Control for Formation Stability of Autonomous Robotic Systems. In *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Seiten 61–65, Juni 2006. DOI: 10.1109/ICMA.2006.257453.
- [106] T. Guozhen, W. Kai und W. Yaodong. A coordination feedback adaptive control method of traffic network. In *6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, Ausgabe 1, Seiten 347–351, August 2011. DOI: 10.1109/ITAIC.2011.6030220.
- [107] U. Gurcuoglu, G. Puerto-Souza, F. Morbidi und G. Mariottini. Hierarchical control of a team of quadrotors for cooperative active target tracking. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 5730–5735, November 2013. DOI: 10.1109/IROS.2013.6697186.
- [108] L. Guvenc, I. Uygan, K. Kahraman, R. Karaahmetoglu, I. Altay, M. Senturk, M. Emirler, A. Karci, B. Guvenc, E. Altug, M. Turan, O. Tas, E. Bozkurt, U. Ozguner, K. Redmill, A. Kurt und B. Efendioglu. Cooperative Adaptive Cruise Control Implementation of Team Mekar at the Grand Cooperative Driving Challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):1062–1074, September 2012. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2012.2204053.
- [109] P. Hackbarth, E. Kreuzer, A. Gray und J. Hedrick. Collaborative control of multiple AUVs for improving the estimation of flow field dependent variables. In *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, Seiten 1–6, September 2012. DOI: 10.1109/AUV.2012.6380754.
- [110] S. Hallé, F. Gilbert, J. Laumonier und B. Chaib-draa. Architectures for Collaborative Driving Vehicles: From a Review to a Proposal. Technischer Bericht, Université Laval, 2003.
- [111] S. Hallé, J. Laumonier und B. Chaib-draa. A decentralized approach to collaborative driving coordination. In *7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 453–458, Oktober 2004. DOI: 10.1109/ITSC.2004.1398942.
- [112] J. Han, C. Wang und G. Yi. Cooperative control of UAV based on Multi-Agent System. In *8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Seiten 96–101, Juni 2013. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566347.
- [113] S.-Y. Han, Y.-H. Chen, L. Wang und A. Abraham. Decentralized Longitudinal Tracking Control for Cooperative Adaptive Cruise Control Systems in a Platoon. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Seiten 2013–2018, Oktober 2013. DOI: 10.1109/SMC.2013.345.
- [114] R. Haupt und S. Haupt. *Practical Genetic Algorithms*. Wiley InterScience electronic collection. Wiley, 2004. ISBN 9780471671756.
- [115] C. Hecht. Überholen auf Landstraßen - Motive, Nutzen und Risiken von Überholmanövern. Technischer Bericht, ADAC, 2011.
- [116] J. Hedrick, M. Tomizuka und P. Varaiya. Control issues in automated highway systems. *IEEE Control Systems*, 14(6):21–32, Dezember 1994. ISSN 1066-033X. DOI: 10.1109/37.334412.
- [117] A. Hegyi, B. De Schutter, H. Hellendoorn und T. van den Boom. Optimal coordination of ramp metering and variable speed control-an MPC approach. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 5, Seiten 3600–3605, 2002. DOI: 10.1109/ACC.2002.1024487.

- 
- [118] A. Hegyi, B. Netten, M. Wang, W. Schakel, T. Schreiter, Y. Yuan, B. van Arem und T. Alkim. A cooperative system based variable speed limit control algorithm against jam waves - an extension of the SPECIALIST algorithm. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 973–978, Oktober 2013. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728358.
- [119] T. H. Heung, T.-K. Ho und Y.-F. Fung. Coordinated road-junction traffic control by dynamic programming. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(3):341–350, September 2005. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2005.853713.
- [120] J.-M. Hoc. Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *Int. J. Human-Computer Studies*, 54:509–540, 2001. DOI: 10.1006/IJHC.2000.0454.
- [121] J.-M. Hoc. *Intelligence and Technology - The Impact of Tools on the Nature and Development of Human Abilities*, Kapitel Cooperation Between Human Cognition and Technology in Dynamic Situations, Seiten 135–157. Lawrence Erlbaum Associates, 2005.
- [122] W. Hongjian, T. Bingling, L. Feng und L. Juan. Research on cooperation mission control of AUVs based on Semantic Knowledge Framework. In *MTS/IEEE OCEANS*, Seiten 1–7, Juni 2013. DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608062.
- [123] R. Horowitz und P. Varaiya. Control design of an automated highway system. *Proceedings of the IEEE*, 88(7):913–925, Juli 2000. ISSN 0018-9219. DOI: 10.1109/5.871301.
- [124] Y. Hou und R. Allen. Behaviour-based Rules with Fuzzy Logic Controlled Priority Weights in Multi-UUVs Team Cooperation. In *OCEANS*, Seiten 1–6, Juni 2007. DOI: 10.1109/OCEANSE.2007.4302385.
- [125] L. Hu, W. Sun und H. Wang. An extended model predictive control approach to coordinated ramp metering. In *IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Seiten 681–686, Juni 2013. DOI: 10.1109/ICCA.2013.6564996.
- [126] Y. Huang, Y. Kang und S. Zhao. Traffic signal coordination control method for river-crossing road bridge under load-bearing restriction. In *International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*, Seiten 601–604, Dezember 2011. DOI: 10.1109/TMEE.2011.6199275.
- [127] M. Hübner. *Modellbildung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen und Konsens-Algorithmen*. Dissertation, TU Braunschweig, 2012.
- [128] D. Jiang, Y. Pang und Z. Qin. Application of MOOS-IvP architecture in multiple autonomous underwater vehicle cooperation. In *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Seiten 1802–1807, Mai 2010. DOI: 10.1109/CCDC.2010.5498587.
- [129] D. Jiang, Y. Pang und Z. Qin. Coordinated control of multiple autonomous underwater vehicle system. In *8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Seiten 4901–4906, Juli 2010. DOI: 10.1109/WCICA.2010.5554889.
- [130] N. Jiang, X. Yang und S. Tang. Delimitation of Traffic Coordinated Control Sub-Area for the Road Network Containing Freeway. In *Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, Seiten 72–76, August 2008. DOI: 10.1109/PEITS.2008.21.
- [131] S. Joo, X. Y. Lu und J. Hedrick. Longitudinal maneuver design in coordination layer for automated highway system. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 1, Seiten 42–47, Juni 2003. DOI: 10.1109/ACC.2003.1238911.

- [132] V. Kaliappan, H. Yong, D. Min und A. Budiyo. Behavior-based decentralized approach for cooperative control of a multiple small scale unmanned helicopter. In *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, Seiten 196–201, November 2011. DOI: 10.1109/ISDA.2011.6121654.
- [133] R. Kamalanathsharma und H. Rakha. Agent-based modeling of Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control systems in the vicinity of intersections. In *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 840–845, September 2012. DOI: 10.1109/ITSC.2012.6338643.
- [134] B. Kamel, A. Benasser und D. Jolly. Flatness Based Control of Traffic Flow for Coordination of Ramp Metering and Variable Speed Limits. In *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 838–843, Oktober 2008. DOI: 10.1109/ITSC.2008.4732713.
- [135] I. Kaminer, O. Yakimenko, V. Dobrokhodov, M. Lizarraga und A. Pascoal. Cooperative control of small UAVs for naval applications. In *43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 1, Seiten 626–631, Dezember 2004. DOI: 10.1109/CDC.2004.1428714.
- [136] I. Kaminer, O. Yakimenko und A. Pascoal. Coordinated control of multiple UAVs for time-critical applications. In *IEEE Aerospace Conference*, Seiten 1–10, 2006. DOI: 10.1109/AERO.2006.1656026.
- [137] I. Kaminer, O. Yakimenko, A. Pascoal und R. Ghabcheloo. Path Generation, Path Following and Coordinated Control for TimeCritical Missions of Multiple UAVs. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 4906–4913, Juni 2006. DOI: 10.1109/ACC.2006.1657498.
- [138] W. Kang und A. Spars. Modelling and computation of optimal task assignment for cooperative control. In *42nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 1, Seiten 1017–1022, Dezember 2003. DOI: 10.1109/CDC.2003.1272701.
- [139] S. Kato, S. Tsugawa, K. Tokuda, T. Matsui und H. Fujii. Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(3):155–161, September 2002. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2002.802929.
- [140] E. Kazerooni und K. Khorasani. Semi-Decentralized Optimal Control of a Cooperative Team of Agents. In *IEEE International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, Seiten 1–7, April 2007. DOI: 10.1109/SYBOSE.2007.4304280.
- [141] T. Keviczky, K. Fregene, F. Borrelli, G. Balas und D. Godbole. Coordinated autonomous vehicle formations: decentralization, control synthesis and optimization. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 2022–2027, Juni 2006. DOI: 10.1109/ACC.2006.1656517.
- [142] T. Keviczky, F. Borrelli, K. Fregene, D. Godbole und G. Balas. Decentralized Receding Horizon Control and Coordination of Autonomous Vehicle Formations. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(1):19–33, Januar 2008. ISSN 1063-6536. DOI: 10.1109/TCST.2007.903066.
- [143] W. Khaisongkram und S. Hara. Performance analysis of decentralized cooperative driving under non-symmetric bidirectional information architecture. In *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, Seiten 2035–2040, September 2010. DOI: 10.1109/CCA.2010.5611069.
- [144] R. Kianfar, P. Falcone und J. Fredriksson. A receding horizon approach to string stable cooperative adaptive cruise control. In *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 734–739, Oktober 2011. DOI: 10.1109/ITSC.2011.6083088.

- 
- [145] R. Kianfar, B. Augusto, A. Ebadighajari, U. Hakeem, J. Nilsson, A. Raza, R. Tabar, N. Irukulapati, C. Englund, P. Falcone, S. Papanastasiou, L. Svensson und H. Wymeersch. Design and Experimental Validation of a Cooperative Driving System in the Grand Cooperative Driving Challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):994–1007, September 2012. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2012.2186513.
- [146] M. Kleinhagenbrock. *Interaktive Verhaltenssteuerung für Robot Companions*. Dissertation, Universität Bielefeld, 2004.
- [147] B. Kloiber, T. Strang und F. de Ponte-Muller. Slipstream cooperative adaptive cruise control - A conceptual ITS application for electric vehicles. In *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Seiten 1–5, März 2012. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183170.
- [148] T. Koishi und T. Murakami. An approach to cooperative control for formation flight of multiple autonomous helicopters. In *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON)*, Seiten 1456–1461, November 2009. DOI: 10.1109/IECON.2009.5414722.
- [149] J. Kolodko und L. Vlacic. Cooperative autonomous driving at the Intelligent Control Systems Laboratory. *IEEE Intelligent Systems*, 18(4):8–11, Juli 2003. ISSN 1541-1672. DOI: 10.1109/MIS.2003.1217622.
- [150] X. Kong, F. Xia, C. Lin und G. Shen. Urban arterial traffic intelligent coordination control technique and its application. In *8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Seiten 5042–5047, Juli 2010. DOI: 10.1109/WCICA.2010.5554643.
- [151] H. Kowshik, D. Caveney und P. Kumar. Provable Systemwide Safety in Intelligent Intersections. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(3):804–818, März 2011. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2011.2107584.
- [152] F. Kramer. *Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen*, Kapitel Die integrale Sicherheit, Seiten 1–9. Springer Vieweg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-8348-2608-4\_1.
- [153] R. Kristiansen, P. Nicklasson und J. Gravdahl. Formation Modelling and 6DOF Spacecraft Coordination Control. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 4690–4696, Juli 2007. DOI: 10.1109/ACC.2007.4282636.
- [154] R. Kruse. *Computational Intelligence*, Kapitel Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik, Seiten 253–277. Vieweg+Teubner Verlag, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4471-7296-3.
- [155] R. Kruse, J. E. Gebhard und F. Klawonn. *Foundations of Fuzzy Systems*. Wiley, 1994.
- [156] F. Kückkay. 3F-Methode, Requirement Engineering (Anforderungsermittlung). Technischer Bericht, Technische Universität Braunschweig, 2010.
- [157] R. Kumar und J. Stover. A behavior-based intelligent control architecture with application to coordination of multiple underwater vehicles. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 30(6):767–784, November 2000. ISSN 1083-4427. DOI: 10.1109/3468.895899.
- [158] K. Kunkel-Razum. *Duden - Das Bedeutungswörterbuch: 10*. Dudenverlag, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus, 2002.
- [159] S. Lam und J. Katupitiya. Cooperative autonomous platoon maneuvers on highways. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Seiten 1152–1157, Juli 2013. DOI: 10.1109/AIM.2013.6584249.

- [160] Y. Lan, G. Yan und Z. Lin. A hybrid control approach to cooperative target tracking with multiple mobile robots. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 2624–2629, Juni 2009. DOI: 10.1109/ACC.2009.5160617.
- [161] Y. Lan, G. Yan und Z. Lin. A hybrid control approach to multi-robot coordinated path following. In *48th IEEE Conference on Decision and Control / 28th Chinese Control Conference (CDC/CCC)*, Seiten 3032–3037, Dezember 2009. DOI: 10.1109/CDC.2009.5400688.
- [162] Y. Lan, G. Yan und Z. Lin. Synthesis of Distributed Control of Coordinated Path Following Based on Hybrid Approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(5):1170–1175, Mai 2011. ISSN 0018-9286. DOI: 10.1109/TAC.2011.2107070.
- [163] Landesverkehrswacht Niedersachsen e.V.. Fahren auf der Autobahn. Letzter Zugriff am 10.07.2015 unter <http://www.landesverkehrswacht.de/wissenswertes/sicherheitstipps/fahren-auf-der-autobahn.html>.
- [164] S. LaValle. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006. DOI: 10.1017/cbo9780511546877.
- [165] T. Le, C. Cai und T. Walsh. Adaptive signal-vehicle cooperative controlling system. In *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 236–241, Oktober 2011. DOI: 10.1109/ITSC.2011.6083140.
- [166] I.-H. Lee und H. Bang. Cooperative control of multiple Electronic Combat Air Vehicles for electronic attack. In *Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE)*, Seiten 2127–2130, August 2008. DOI: 10.1109/SICE.2008.4655014.
- [167] J. Lee und B. Park. Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles Environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1):81–90, März 2012. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2011.2178836.
- [168] A. Lehmann. *Neues Konzept zur Planung, Ausführung und Überwachung von Roboteraufgaben mit hierarchischen Petri-Netzen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2008.
- [169] K. Lemmer, C. Schießl, M. Staubach, B. Friedrich, S. Hoffmann, R. Kutzner, C. Lippold, R. Schulz, D. Otte und M. Jänsch. Konzept zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit auf der A2. Technischer Bericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2010.
- [170] N. Leonard und E. Fiorelli. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups. In *40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 3, Seiten 2968–2973, 2001. DOI: 10.1109/.2001.980728.
- [171] C. Li. Decentralized cooperative control for multivehicle formation without velocity measurement. In *48th IEEE Conference on Decision and Control / 28th Chinese Control Conference (CDC/CCC)*, Seiten 3442–3447, Dezember 2009. DOI: 10.1109/CDC.2009.5399505.
- [172] D. Li und J. Cruz. Better cooperative control with limited look-ahead. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 4914–4919, Juni 2006. DOI: 10.1109/ACC.2006.1657499.
- [173] G. Li, K.-C. Lin und Z. Xia. Rule-Based Control of Collaborative Robots. In *16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence—Workshops (ICAT)*, Seiten 68–72, November 2006. DOI: 10.1109/ICAT.2006.114.
- [174] H. Li, C. Yuan und J. Zhang. A coordinated control framework and algorithm used for relieving traffic congestion in the scope of exit-ramp of the expressway and its downstream intersection. In *9th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Seiten 511–518, Juni 2011. DOI: 10.1109/WCICA.2011.5970566.



- 
- [175] L. Li und F.-Y. Wang. Cooperative driving at adjacent blind intersections. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Ausgabe 1, Seiten 847–852, Oktober 2005. DOI: 10.1109/ICSMC.2005.1571252.
- [176] L. Li und F.-Y. Wang. Cooperative Driving at Blind Crossings Using Intervehicle Communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(6):1712–1724, November 2006. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2006.878730.
- [177] L. Li, H. Gao, R. Liu und F. Wang. Control signal coordination of two adjacent traffic intersections. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Ausgabe 6, Oktober 2002. DOI: 10.1109/ICSMC.2002.1175595.
- [178] L. Li, F.-Y. Wang und H. Kim. Cooperative driving and lane changing at blind crossings. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 435–440, Juni 2005. DOI: 10.1109/IVS.2005.1505142.
- [179] L. Li, F.-Y. Wang und Y. Zhang. Cooperative Driving at Lane Closures. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 1156–1161, Juni 2007. DOI: 10.1109/IVS.2007.4290274.
- [180] S. Li, K. Li, R. Rajamani und J. Wang. Multi-objective coordinated control for advanced adaptive cruise control system. In *48th IEEE Conference on Decision and Control / 28th Chinese Control Conference (CDC/CCC)*, Seiten 3539–3544, Dezember 2009. DOI: 10.1109/CDC.2009.5400863.
- [181] X.-R. Liang, Y.-K. Fan und T. Jiang. Application of PSO algorithm to coordinated ramp control. In *International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, Ausgabe 3, Seiten 1712–1716, Juli 2009. DOI: 10.1109/ICMLC.2009.5212350.
- [182] D. Lipinski und K. Mohseni. A master-slave fluid cooperative control algorithm for optimal trajectory planning. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 3347–3351, Mai 2011. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980401.
- [183] C. Löper und F. O. Flemisch. Ein Baustein für hochautomatisiertes Fahren: Kooperative, manöverbasierte Automation in den Projekten H-Mode und HAVEit. In *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, Seiten 136–146. Stiller, C. and Maurer, M., 2009.
- [184] J. Luntz und W. Messner. Networking and communication language for the virtual vehicle: a highly distributed coordination control system. In *IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC)*, Seiten 230–235, September 1996. DOI: 10.1109/ISIC.1996.556206.
- [185] J. Luntz, E. Rollins und W. Messner. The virtual vehicle-a materials handling system using highly distributed coordination control. In *4th IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Seiten 742–747, September 1995. DOI: 10.1109/CCA.1995.555841.
- [186] P. Luo, Q. Ma und H. Huang. Urban Trunk Road Traffic Signal Coordinated Control Based on Multi-Objective Immune Algorithm. In *International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR)*, Seiten 72–76, Februar 2009. DOI: 10.1109/CAR.2009.99.
- [187] P. Luo, Q. Ma und H. Huang. Modeling and Simulation of Urban Trunk Road Traffic Signal Coordinated Control Based on Immune Algorithm. In *International Conference on Advanced Computer Control (ICACC)*, Seiten 287–291, Januar 2009. DOI: 10.1109/ICACC.2009.64.
- [188] C. Ma, J. Zeng, Y. Qian, X. Guang und Y. Sun. Study on urban loop-road traffic coordination control system based on spit-layer parallel cusp catastrophe particle swarm optimization algorithm. In *2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR)*, Ausgabe 2, Seiten 529–532, März 2010. DOI: 10.1109/CAR.2010.5456615.

- [189] J. Ma, F. Zhou und M. Demetsky. Evaluating mobility and sustainability benefits of cooperative adaptive cruise control using agent-based modeling approach. In *IEEE Systems and Information Design Symposium (SIEDS)*, Seiten 74–78, April 2012. DOI: 10.1109/SIEDS.2012.6215145.
- [190] Y. Ma, Y. Xu, Q. Wu und R. Zhang. Hybrid control for cooperative vehicle-platoon via the hardware-in-the-loop simulator. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 2373–2378, Oktober 2013. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728582.
- [191] D. H. A. Maithripala und S. Jayasuriya. Phantom Track Generation in 3D through Cooperative Control of Multiple ECAVs Based on Geometry. In *First International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, Seiten 255–260, August 2006. DOI: 10.1109/ICIIS.2006.365733.
- [192] D. H. A. Maithripala und S. Jayasuriya. Feasibility considerations in formation control: Phantom track generation through multi-UAV collaboration. In *47th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Seiten 3959–3964, Dezember 2008. DOI: 10.1109/CDC.2008.4738822.
- [193] K. Malakorn und B. Park. Assessment of mobility, energy, and environment impacts of IntelliDrive-based Cooperative Adaptive Cruise Control and Intelligent Traffic Signal control. In *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, Seiten 1–6, Mai 2010. DOI: 10.1109/ISSST.2010.5507709.
- [194] T. W. Malone und K. Crowston. The Interdisciplinary Study of Coordination. *ACM Computing Surveys*, 26(1):87–119, März 1994. ISSN 0360-0300. DOI: 10.1145/174666.174668.
- [195] J. Mao und L. Chen. Runtime Monitoring for Cyber-physical Systems: A Case Study of Cooperative Adaptive Cruise Control. In *Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA)*, Seiten 509–515, Januar 2012. DOI: 10.1109/ISDEA.2012.592.
- [196] S. Marapane, M. Trivedi, N. Lassiter und M. Holder. Motion control of cooperative robotic teams through visual observation and fuzzy logic control. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Ausgabe 2, Seiten 1738–1743, April 1996. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.506963.
- [197] J. Marden, G. Arslan und J. Shamma. Cooperative Control and Potential Games. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 39(6):1393–1407, Dezember 2009. ISSN 1083-4419. DOI: 10.1109/TSMCB.2009.2017273.
- [198] A. Martins, J. Almeida und E. Silva. Coordinated maneuver for gradient search using multiple AUVs. In *OCEANS*, Ausgabe 1, Seiten 347–352, September 2003. DOI: 10.1109/OCEANS.2003.178583.
- [199] T. McLain, P. R. Chandler, S. Rasmussen und M. Pachter. Cooperative control of UAV rendezvous. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 3, Seiten 2309–2314, 2001. DOI: 10.1109/ACC.2001.946096.
- [200] M. Mears und M. Akella. Deception of radar systems using cooperatively controlled unmanned air vehicles. In *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Seiten 332–335, März 2005. DOI: 10.1109/ICNSC.2005.1461211.
- [201] J. Medina und R. Benekohal. Traffic signal control using reinforcement learning and the max-plus algorithm as a coordinating strategy. In *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 596–601, September 2012. DOI: 10.1109/ITSC.2012.6338911.
- [202] J. Mejia und D. Stipanovic. Safe coordination control policy for multiple input constrained nonholonomic vehicles. In *48th IEEE Conference on Decision and Control / 28th Chinese Control Conference (CDC/CCC)*, Seiten 5679–5684, Dezember 2009. DOI: 10.1109/CDC.2009.5400488.

- 
- [203] R. Mellish und D. Paley. Backstepping control design for motion coordination of self-propelled vehicles. In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Seiten 5468–5473, Dezember 2010. DOI: 10.1109/CDC.2010.5717256.
- [204] F. Michaud, P. Lepage, P. Frenette, D. Letourneau und N. Gaubert. Coordinated Maneuvering of Automated Vehicles in Platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4):437–447, Dezember 2006. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2006.883939.
- [205] M. Miegler, R. Schieber, A. Kern, T. Ganslmeier und M. Nentwig. Hardware-in-the-loop Test of Advanced Driver Assistance Systems. *ATZechnik*, 4(5):14–19, 2009.
- [206] V. Milanés, J. Alonso, L. Bouraoui und J. Ploeg. Cooperative Maneuvering in Close Environments Among Cybercars and Dual-Mode Cars. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1):15–24, März 2011. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2010.2050060.
- [207] E. F. Moore. *Automata Studies*, Kapitel Gedanken-Experiments on Sequential Machines, Seiten 129–154. Annals of mathematics studies. Princeton University Press, 1956. ISBN 9780691079165. DOI: 10.1515/9781400882618-006.
- [208] J. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia und T. de Pedro. Cooperative Throttle and Brake Fuzzy Control for ACC+Stop&Go Maneuvers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(4):1623–1630, Juli 2007. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2007.897632.
- [209] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, G. Ricardo und T. de Pedro. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, Kapitel Fuzzy Logic for Transportation Guidance: Developing Fuzzy Controllers for Maintaining an Inter-Vehicle Safety Headway, Seiten 129–143. Springer London, 2006. DOI: 10.1007/978-1-84628-469-4\_9.
- [210] C. Y. Narasimha. *Coordinating Autonomous Planning and Scheduling*. Dissertation, TU Delft, 2013.
- [211] J. Nash. Two-person Cooperative Games. *Econometrica*, 21:128–140, 1953. DOI: 10.2307/1906951.
- [212] G. Naus, R. Vugts, J. Ploeg, R. van de Molengraft und M. Steinbuch. Cooperative adaptive cruise control, design and experiments. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 6145–6150, Juni 2010. DOI: 10.1109/ACC.2010.5531596.
- [213] L. Ng, C. Clark und J. Huissoon. Reinforcement learning of adaptive longitudinal vehicle control for dynamic collaborative driving. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 907–912, Juni 2008. DOI: 10.1109/IVS.2008.4621222.
- [214] B. Nguyen, Y.-L. Chuang, D. Tung, C. Hsieh, Z. Jin, L. Shi, D. Marthaler, A. Bertozzi und R. Murray. Virtual attractive-repulsive potentials for cooperative control of second order dynamic vehicles on the Caltech MVWT. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 2, Seiten 1084–1089, Juni 2005. DOI: 10.1109/ACC.2005.1470105.
- [215] H.-N. Nguyen und D. Lee. Coordinated rotation control of multiple rigid bodies in  $SO(3)$ . In *13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Seiten 1671–1673, Oktober 2013. DOI: 10.1109/ICCAS.2013.6704201.
- [216] M. Nieuwenhuijze, T. van Keulen, S. Öncü, B. Bensen und H. Nijmeijer. Cooperative Driving With a Heavy-Duty Truck in Mixed Traffic: Experimental Results. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):1026–1032, September 2012. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2012.2202230.
- [217] F. Noreils. Integrating multirobot coordination in a mobile-robot control system. In *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems 'Towards a New Frontier of Applications' (IROS)*, Ausgabe 1, Seiten 43–49, Juli 1990. DOI: 10.1109/IROS.1990.262367.

- [218] M. Nowak. Five Rules for the Evolution of Cooperation. *SCIENCE*, 314:1560–1563, 2006. DOI: 10.1126/SCIENCE.1133755.
- [219] U. Ogras, O. Dagci und U. Ozguner. Cooperative control of mobile robots for target search. In *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Seiten 123–128, Juni 2004. DOI: 10.1109/ICMECH.2004.1364424.
- [220] P. Ogren, M. Egerstedt und X. Hu. A control Lyapunov function approach to multi-agent coordination. In *40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 2, Seiten 1150–1155, 2001. DOI: 10.1109/.2001.981040.
- [221] P. Ogren, E. Fiorelli und N. Leonard. Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(8):1292–1302, August 2004. ISSN 0018-9286. DOI: 10.1109/TAC.2004.832203.
- [222] R. Olmi, C. Secchi und C. Fantuzzi. An efficient control strategy for the traffic coordination of AGVs. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 4615–4620, September 2011. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094474.
- [223] Oxford University Press. *Oxford American Desk Dictionary & Thesaurus*. Oxford University Press, USA, 2010. ISBN 9780199739271.
- [224] D. Pack, G. York und R. Fierro. Information-Based Cooperative Control for Multiple Unmanned Aerial Vehicles. In *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Seiten 446–450, 2006. DOI: 10.1109/ICNSC.2006.1673187.
- [225] D. Pack, P. DeLima, G. Toussaint und G. York. Cooperative Control of UAVs for Localization of Intermittently Emitting Mobile Targets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 39(4):959–970, August 2009. ISSN 1083-4419. DOI: 10.1109/TSMCB.2008.2010865.
- [226] D. Paley, F. Zhang und N. Leonard. Cooperative Control for Ocean Sampling: The Glider Coordinated Control System. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(4):735–744, Juli 2008. ISSN 1063-6536. DOI: 10.1109/TCST.2007.912238.
- [227] Y.-J. Pan. Decentralized Robust Control Approach for Coordinated Maneuvering of Vehicles in Platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(2):346–354, Juni 2009. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2009.2020194.
- [228] D. Panagou und K. Kyriakopoulos. Cooperative formation control of underactuated marine vehicles for target surveillance under sensing and communication constraints. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 1871–1876, Mai 2013. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630824.
- [229] E. Pasanen. Driving Speeds and Pedestrian Safety. Technischer Bericht, Helsinki University of Technology, 1992.
- [230] P. Pascheka und M. Düring. Advanced Cooperative Decentralized Decision Making using a Cooperative Reward System. In *IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Seiten 396–402, September 2015. DOI: 10.1109/INISTA.2015.7276779.
- [231] F. Pasqualetti, A. Franchi und F. Bullo. On cooperative patrolling: Optimal trajectories, complexity analysis, and approximation algorithms. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(3):592–606, 2012. DOI: 10.1109/TRO.2011.2179580.
- [232] Z. Peng, D. Wang, W. Lan, X. Li und G. Sun. Decentralized cooperative control of autonomous surface vehicles with uncertain dynamics: A dynamic surface approach. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 2174–2179, Juni 2011. DOI: 10.1109/ACC.2011.5990621.

- 
- [233] A. Pongpunwattana, R. Wise, R. Rysdyk und A. Kang. Multi-Vehicle Cooperative Control Flight Test. In *IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Seiten 1–11, Oktober 2006. DOI: 10.1109/DASC.2006.313717.
- [234] I. Porche und S. Lafortune. Dynamic traffic control: decentralized and coordinated methods. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation System (ITSC)*, Seiten 930–935, November 1997. DOI: 10.1109/ITSC.1997.660598.
- [235] K. Purvis, K. Astrom und M. Khammash. Online Control Strategies for Highly Coupled Cooperative UAVs. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 3961–3966, Juli 2007. DOI: 10.1109/ACC.2007.4283125.
- [236] Y. Qian, C. Wang, H. Wang und Z. Wang. The Optimization Design of Urban Traffic Signal Control Based on Three Swarms Cooperative-particle Swarm Optimization. In *IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, Seiten 512–515, August 2007. DOI: 10.1109/ICAL.2007.4338618.
- [237] Z. Qu, J. Wang und R. Hull. Cooperative Control of Dynamical Systems With Application to Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 53(4):894–911, Mai 2008. ISSN 0018-9286. DOI: 10.1109/TAC.2008.920232.
- [238] S. Quinlan und O. Khatib. Elastic bands: connecting path planning and control. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Ausgabe 2, Seiten 802–807, May 1993. DOI: 10.1109/ROBOT.1993.291936.
- [239] R. Rahimi und F. Abdollahi. Optimal formation of a collaborative maneuver with inequality constraints. In *First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, Seiten 462–467, Februar 2013. DOI: 10.1109/ICRoM.2013.6510151.
- [240] F. Raimondi und M. Melluso. Fuzzy cooperative control of automated ground passenger vehicles. In *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Seiten 1364–1371, September 2007. DOI: 10.1109/ETFA.2007.4416939.
- [241] J. Randolph. A Guide to Writing the Dissertation Literature Review. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 14(13):1–13, 2009.
- [242] K. Regenstern. *Modulare, verteilte Hardware-Software-Architektur für humanoide Roboter*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- [243] K. Reif. *Bremsen und Bremsregelsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010. DOI: 10.1007/978-3-8348-9714-5.
- [244] B. Ren, H. Pei, Z. Sun, S. Ge und T.-H. Lee. Decentralized cooperative control for swarm agents with high-order dynamics. In *IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, Seiten 90–95, August 2009. DOI: 10.1109/ICAL.2009.5262969.
- [245] W. Ren. Cooperative Control Design Strategies with Local Interactions. In *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Seiten 451–456, 2006. DOI: 10.1109/ICNSC.2006.1673188.
- [246] W. Ren. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations. *IET Control Theory Applications*, 1(2):505–512, März 2007. ISSN 1751-8644. DOI: 10.1049/IET-CTA:20050401.
- [247] W. Ren, R. Beard und E. Atkins. Information consensus in multivehicle cooperative control. *IEEE Control Systems*, 27(2):71–82, April 2007. ISSN 1066-033X. DOI: 10.1109/MCS.2007.338264.

- [248] P. Resende und F. Nashashibi. Real-time dynamic trajectory planning for highly automated driving in highways. In *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 653–658, September 2010. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625194.
- [249] A. Richards und J. How. Decentralized model predictive control of cooperating UAVs. In *43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 4, Seiten 4286–4291, Dezember 2004. DOI: 10.1109/CDC.2004.1429425.
- [250] E. J. Rodriguez-Seda, D. Stipanovic und M. Spong. Lyapunov-based cooperative avoidance control for multiple Lagrangian systems with bounded sensing uncertainties. In *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, Seiten 4207–4213, Dezember 2011. DOI: 10.1109/CDC.2011.6160783.
- [251] H. Roosbehani, S. Rudaz und D. Gillet. A hamilton-jacobi formulation for cooperative control of multi-agent systems. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Seiten 4813–4818, Oktober 2009. DOI: 10.1109/ICSMC.2009.5346065.
- [252] A. Ryan, J. Tisdale, M. Godwin, D. Coatta, D. Nguyen, S. Spry, R. Sengupta und J. Hedrick. Decentralized Control of Unmanned Aerial Vehicle Collaborative Sensing Missions. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 4672–4677, Juli 2007. DOI: 10.1109/ACC.2007.4282397.
- [253] N. Salazar, J. A. Rodriguez-Aguilar, J. L. Arcos, A. Peleteiro und J. C. Burguillo-Rial. Emerging Cooperation on Complex Networks. In *10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, Ausgabe 2, Seiten 669–676. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2011. ISBN 0-9826571-6-1, 978-0-9826571-6-4.
- [254] A. Salkham, R. Cunningham, A. Garg und V. Cahill. A Collaborative Reinforcement Learning Approach to Urban Traffic Control Optimization. In *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT)*, Ausgabe 2, Seiten 560–566, Dezember 2008. DOI: 10.1109/WIIAT.2008.88.
- [255] J. Schmidt, C. Klüver und J. Klüver. *Programmierung naturanaloger Verfahren - Soft Computing und verwandte Methoden*, Kapitel Simulationen mit Fuzzy-Logik, Seiten 119 – 137. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [256] R. Schnüll. Bemessungsfahrzeuge und Schleppkurven zur Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2001.
- [257] T. Schouwenaars, J. How und E. Feron. Decentralized Cooperative Trajectory Planning of Multiple Aircraft with Hard Safety Guarantees. Technischer Bericht, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [258] J. Schröder. *Adaptive Verhaltensentscheidung und Bahnplanung für kognitive Automobile*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2009.
- [259] R. Selten. Die konzeptionellen Grundlagen der Spieltheorie einst und jetzt. Technischer Bericht, Bonn Graduate School of Economics, 2001.
- [260] E. Semsar und K. Khorasani. Optimal Control and Game Theoretic Approaches to Cooperative Control of a Team of Multi-Vehicle Unmanned Systems. In *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Seiten 628–633, April 2007. DOI: 10.1109/ICNSC.2007.372852.
- [261] M. Senturk, I. Uygan und L. Guvenc. Mixed Cooperative Adaptive Cruise Control for light commercial vehicles. In *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, Seiten 1506–1511, Oktober 2010. DOI: 10.1109/ICSMC.2010.5642427.

- 
- [262] C. Shao und D. Hristu-Varsakelis. Bio-inspired optimal control via intermittent cooperation. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 2, Seiten 1060–1065, Juni 2005. DOI: 10.1109/ACC.2005.1470101.
- [263] G. Shen und X. Kong. Study on Road Network Traffic Coordination Control Technique With Bus Priority. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 39(3):343–351, Mai 2009. ISSN 1094-6977. DOI: 10.1109/TSMCC.2008.2005842.
- [264] H. Shi, L. Wang und T. Chu. Coordinated Control of Multiple Interactive Dynamical Agents with Asymmetric Coupling Pattern and Switching Topology. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 3209–3214, Oktober 2006. DOI: 10.1109/IROS.2006.282424.
- [265] R. Smith und F. Hadaegh. A distributed parallel estimation architecture for cooperative vehicle formation control. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 4219–4224, Juni 2006. DOI: 10.1109/ACC.2006.1657381.
- [266] J. Sousa, P. Calado und R. Martins. Coordinated control of ocean going vehicles. In *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, Seiten 1–5, September 2012. DOI: 10.1109/AUV.2012.6380756.
- [267] S. Spry und J. Hedrick. Formation control using generalized coordinates. In *43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Ausgabe 3, Seiten 2441–2446, Dezember 2004. DOI: 10.1109/CDC.2004.1428775.
- [268] T. Stanger und L. del Re. A model predictive Cooperative Adaptive Cruise Control approach. In *American Control Conference (ACC)*, Seiten 1374–1379, Juni 2013. DOI: 10.1109/ACC.2013.6580028.
- [269] T. Starzak. *Kognition bei Menschen und Tieren: Eine vergleichende philosophische Perspektive*. Epistemische Studien. De Gruyter, 2014. ISBN 9783110368901. DOI: 10.1515/9783110368901.
- [270] Statistisches Bundesamt. Unfallentwicklung auf deutschen Straßen. Technischer Bericht, Statistisches Bundesamt, 2010.
- [271] Statistisches Bundesamt. Verkehrsunfälle - Zeitreihen 2014. Technischer Bericht, Statistisches Bundesamt, 2015.
- [272] Statistisches Bundesamt. Verkehrsunfälle - Zeitreihen 2016. Technischer Bericht, Statistisches Bundesamt, 2017.
- [273] A. Stevenson. *Oxford Dictionary of English*. Oxford reference online premium. Oxford University Press, 2010. ISBN 9780199571123.
- [274] C. Stiller und O. Pink. *Advances in Real-Time Systems*, Kapitel Real-Time Knowledge for Cooperative Cognitive Automobiles, Seiten 341–355. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-24349-3\_17.
- [275] C. Stiller, G. Farber und S. Kammel. Cooperative Cognitive Automobiles. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 215–220, Juni 2007. DOI: 10.1109/IVS.2007.4290117.
- [276] D. Stilwell und J. Bay. Optimal control for cooperating mobile robots bearing a common load. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Ausgabe 1, Seiten 58–63, Mai 1994. DOI: 10.1109/ROBOT.1994.351010.
- [277] G. Sun. Coordinated Control of Multi-agent Systems with Bounded Control Inputs and Preserved Network Connectivity. In *Fourth International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications (IWCFTA)*, Seiten 347–351, Oktober 2011. DOI: 10.1109/IWCFTA.2011.68.

- [278] H. Sun, Z. Hou und D. Li. Coordinated Iterative Learning Control Schemes for Train Trajectory Tracking With Overspeed Protection. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(2):323–333, April 2013. ISSN 1545-5955. DOI: 10.1109/TASE.2012.2216261.
- [279] Y. C. Sun und C. Cheah. Coordinated control of multiple cooperative underwater vehicle-manipulator systems holding a common load. In *MTTS/IEEE TECHNO-OCEAN/OCEANS*, Ausgabe 3, Seiten 1542–1547, November 2004. DOI: 10.1109/OCEANS.2004.1406351.
- [280] Y. C. Tan und B. Bishop. Combining Classical and Behavior-Based Control for Swarms of Cooperating Vehicles. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 2499–2504, April 2005. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570488.
- [281] Z. Tangtangning und Y. Li. Distributed parameter model and cooperative control of manipulators handling a flexible payload. In *Sixth International Conference on Natural Computation (ICNC)*, Ausgabe 1, Seiten 233–237, August 2010. DOI: 10.1109/ICNC.2010.5582901.
- [282] Y. Taniguchi, Y. Tsuganezawa und M. Yamakita. Formation control of cooperative transportation of mother ship for SMC. In *41st Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE)*, Ausgabe 1, Seiten 151–156, August 2002. DOI: 10.1109/SICE.2002.1195202.
- [283] N. Teusler. *Strategische Stabilitätsfaktoren in Unternehmenskooperationen*. Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2008.
- [284] M. Tillerson, L. Breger und J. How. Distributed coordination and control of formation flying spacecraft. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 2, Seiten 1740–1745, Juni 2003. DOI: 10.1109/ACC.2003.1239846.
- [285] M. Tlig, O. Buffet und O. Simonin. Cooperative Behaviors for the Self-Regulation of Autonomous Vehicles in Space Sharing Conflicts. In *IEEE 24th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, Ausgabe 1, Seiten 1126–1132, November 2012. DOI: 10.1109/ICTAI.2012.160.
- [286] T. Tran und T. N. Vu. A novel semi-automatic control strategy for multi-agent cooperative formation. In *International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Seiten 190–195, November 2013. DOI: 10.1109/ICCAIS.2013.6720552.
- [287] Z. Triska, N. Miskovic, D. Nad und Z. Vukic. Virtual target algorithm in cooperative control of marine vessels. In *35th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Seiten 806–811, Mai 2012.
- [288] S. Tsugawa, S. Kato, T. Matsui, H. Naganawa und H. Fujii. An architecture for cooperative driving of automated vehicles. In *IEEE Intelligent Transportation Systems*, Seiten 422–427, 2000. DOI: 10.1109/ITSC.2000.881102.
- [289] S. Tsugawa, S. Kato, K. Tokuda, T. Matsui und H. Fujii. A cooperative driving system with automated vehicles and inter-vehicle communications in Demo 2000. In *IEEE Intelligent Transportation Systems*, Seiten 918–923, 2001. DOI: 10.1109/ITSC.2001.948783.
- [290] T. R. Tyler. *Why People Cooperate: The Role of Social Motivations*. Princeton University Press, 2011.
- [291] S. Vacek, R. Nagel, T. Batz und F. Moosmann. An integrated simulation framework for cognitive automobiles. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seiten 221–226, Juni 2007. DOI: 10.1109/IVS.2007.4290118.
- [292] Vägverket. Safe Traffic - Vision Zero on the move. Technischer Bericht, Schwedische Straßenverkehrsbehörde (Vägverket), 2006.



- 
- [293] B. van Arem, C. van Driel und R. Visser. The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4):429–436, Dezember 2006. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2006.884615.
- [294] P. Varaiya. Smart cars on smart roads: problems of control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(2):195–207, Februar 1993. ISSN 0018-9286. DOI: 10.1109/9.250509.
- [295] J. Von Neumann und O. Morgenstern. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 1944.
- [296] K. von Neumann-Cosel, M. Dupuis und C. Weiss. Virtual test drive - provision of a consistent tool-set for [D,H,S,V]-in-the-loop. In *Driving Simulation Conference (DSC)*, 2009.
- [297] D. Wang, Z. Peng, G. Sun und H. Wang. Adaptive dynamic surface control for coordinated target tracking of autonomous surface vehicles using neural networks. In *31st Chinese Control Conference (CCC)*, Seiten 2871–2876, Juli 2012.
- [298] L.-S. Wang und S.-I. Wu. Coordinated Control and Experiments of Pushing an Object by Using Two Unmanned Vehicles. In *International Joint Conference of the Society of Instrument and Control Engineers and the International Council of Associations for Science Education (SICE-ICASE)*, Seiten 623–627, Oktober 2006. DOI: 10.1109/SICE.2006.315710.
- [299] M. Wang, W. Daamen, S. P. Hoogendoorn und B. Arem. Rolling horizon control framework for driver assistance systems. Part II: Cooperative sensing and cooperative control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40:290–311, 2014. ISSN 0968-090X. DOI: 10.1016/J.TRC.2013.11.024.
- [300] M. Wang, W. Daamen, S. P. Hoogendoorn und B. van Arem. Rolling horizon control framework for driver assistance systems. Part I: Mathematical formulation and non-cooperative systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40:271–289, 2014. ISSN 0968-090X. DOI: 10.1016/J.TRC.2013.11.023.
- [301] Y. Wang, Z. Yang und Q. Guan. Traffic Coordination and Control Model of Regional Boundary Based on Fuzzy Control. In *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, Ausgabe 1, Seiten 946–950, Oktober 2008. DOI: 10.1109/ICICTA.2008.469.
- [302] H. Wei, W. Yong, M. Xuanqin und W. Yan. A cooperative fuzzy control method for traffic lights. In *IEEE Intelligent Transportation Systems*, Seiten 185–188, 2001. DOI: 10.1109/ITSC.2001.948653.
- [303] Z. Weihua und T. H. Go. Robust cooperative Leader-follower formation flight control. In *11th International Conference on Control Automation Robotics Vision (ICARCV)*, Seiten 275–280, Dezember 2010. DOI: 10.1109/ICARCV.2010.5707246.
- [304] F. Weinert und M. Düring. Development and Assessment of Cooperative V2X Applications for Emergency Vehicles in an Urban Environment Enabled by Behavioral Models. In *Modeling Mobility with Open Data*, Seiten 125–153. Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-15024-6\_8.
- [305] C. Weiss, F. Keck, A. Neubohn, K. von Neumann-Cosel und A. Kuhn. Virtual Testdrive & kiss - Closed Loop Computer Simulation for the Development of Active Safety Functions. In *Proceedings of the FISITA 2008 - World Automotive Congress*, 2008.
- [306] M. Werling. *Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2010.
- [307] R. Werning, R. Balgo, W. Palmowski und M. Sassenroth. *Sonderpädagogik: Lernen, Verhalten, Sprache, Bewegung und Wahrnehmung*. Hand- und Lehrbücher der Pädagogik. De Gruyter, 2012. ISBN 9783486714968.

- [308] B. Wiegel. *Quality of Service in Fahrzeug-Fahrzeug-Netzen - dezentrale und schichtübergreifende Steuerung des Nachrichtenaufkommens*. Dissertation, Universität Ulm, 2013.
- [309] H. Wiese. *Kooperative Spieltheorie*. Springer-Verlag, 2004. DOI: 10.1524/9783486837469.
- [310] H. Winner. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009. DOI: 10.1007/978-3-8348-9977-4.
- [311] U. Witkowski, M. A. M. El Habbal, S. Herbrechtsmeier, A. Tanoto, J. Penders, L. Alboul und V. Gazi. Ad-hoc Network Communication Infrastructure for Multi-robot Systems in Disaster Scenarios. In *IARP/EURON Workshop on Robotics for Risky Interventions and Environmental Surveillance (RISE)*, 2008.
- [312] E. Xargay, V. Dobrokhodov, I. Kaminer, A. Pascoal, N. Hovakimyan und C. Cao. Time-Critical Cooperative Control of Multiple Autonomous Vehicles: Robust Distributed Strategies for Path-Following Control and Time-Coordination over Dynamic Communications Networks. *IEEE Control Systems*, 32(5):49–73, Oktober 2012. ISSN 1066-033X. DOI: 10.1109/MCS.2012.2205477.
- [313] P. Xavier und Y.-J. Pan. A practical PID-based scheme for the collaborative driving of automated vehicles. In *48th IEEE Conference on Decision and Control / 28th Chinese Control Conference (CDC/CCC)*, Seiten 966–971, Dezember 2009. DOI: 10.1109/CDC.2009.5400734.
- [314] G. Xia und D. Corbett. Cooperative control systems of searching targets using unmanned blimps. In *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Ausgabe 2, Seiten 1179–1183, Juni 2004. DOI: 10.1109/WCICA.2004.1340800.
- [315] X. Xiang, G. Xu, Q. Zhang, Z. Xiao und X. Huang. Coordinated control for multi-AUV systems based on hybrid automata. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Seiten 2121–2126, Dezember 2007. DOI: 10.1109/ROBIO.2007.4522497.
- [316] X. Xiang, L. Lapierre, B. Jouvencel und O. Parodi. Coordinated path following control of multiple nonholonomic vehicles. In *OCEANS*, Seiten 1–7, Mai 2009. DOI: 10.1109/OCEANSE.2009.5278212.
- [317] X. Xiang, L. Lapierre, B. Jouvencel und O. Parodi. Coordinated path following control of multiple wheeled mobile robots through decentralized speed adaptation. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 4547–4552, Oktober 2009. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354073.
- [318] M. Yamakita, Y. Taniguchi und Y. Shukuya. Analysis of formation control of cooperative transportation of mother ship by SMC. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Ausgabe 1, Seiten 951–956, September 2003. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241715.
- [319] Z. Yan und S. Hou. A Coordinated Method Based on Hybrid Intelligent Control Agent for Multi-AUVs Control. In *IEEE International Conference on Information Acquisition (ICIA)*, Seiten 1179–1184, August 2006. DOI: 10.1109/ICIA.2006.305914.
- [320] E. Yang, D. Gu und H. Hu. Nonsingular formation control of cooperative mobile robots via feedback linearization. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 826–831, August 2005. DOI: 10.1109/IROS.2005.1545537.
- [321] L. Yang, Z. Guo, Y. Li und C. Li. Posture Measurement and Coordinated Control of Twin Hoisting-Girder Transporters Based on Hybrid Network and RTK-GPS. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(2): 141–150, April 2009. ISSN 1083-4435. DOI: 10.1109/TMECH.2009.2013616.
- [322] S. Yanhang und Z. Zhou. Cooperative Control for Target Search, Classification and Attack for AUAVs(Attack Uninhabited Air Vehicles). In *Chinese Control Conference (CCC)*, Seiten 99–102, Juli 2007. DOI: 10.1109/CHICC.2006.4346817.

- 
- [323] C. Yao, X. C. Ding und C. Cassandras. Cooperative receding horizon control for multi-agent rendezvous problems in uncertain environments. In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Seiten 4511–4516, Dezember 2010. DOI: 10.1109/CDC.2010.5717767.
- [324] L. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338–353, 1965. DOI: 10.1016/s0019-9958(65)90241-x.
- [325] C. Zhang und R. Ordonez. Decentralized adaptive coordination and control of uninhabited autonomous vehicles via surrogate optimization. In *American Control Conference (ACC)*, Ausgabe 3, Seiten 2205–2210, Juni 2003. DOI: 10.1109/ACC.2003.1243401.
- [326] D. Zhang, L. Wang und J. Yu. Coordinated control of two biomimetic robotic fish in pushing-object task. *IET Control Theory Applications*, 1(5):1200–1207, September 2007. ISSN 1751-8644. DOI: 10.1049/IET-CTA:20060096.
- [327] J. Zhao und D. Tang. Coordination Traffic Control under the Framework of Multi-agent Technology. In *Second International Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE)*, Ausgabe 1, Seiten 219–222, Oktober 2009. DOI: 10.1109/WCSE.2009.657.
- [328] Z. Zhong-Hai, Y. Jian, Z. Wen-Xia und Z. Jin-Ping. Virtual-leader-follower structure and finite-time controller based cooperative control of multiple autonomous underwater vehicles. In *24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Seiten 3670–3675, Mai 2012. DOI: 10.1109/CCDC.2012.6244587.
- [329] S. Zhu, D. Wang und C. B. Low. Cooperative control of multiple UAVs for moving source seeking. In *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Seiten 193–202, Mai 2013. DOI: 10.1109/ICUAS.2013.6564690.
- [330] G. Zlotkin und J. Rosenschein. Negotiation and Conflict Resolution in Non-Cooperative Domains. In *American Association for Artificial Intelligence (AAAI)*, Seiten 100–105, 1990.
- [331] I. Zohdy und H. Rakha. Game theory algorithm for intersection-based cooperative adaptive cruise control (CACC) systems. In *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Seiten 1097–1102, September 2012. DOI: 10.1109/ITSC.2012.6338644.



